

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA
OSTRAVA**

Hornicko-geologická fakulta

institut geoinformatiky

**TESTOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ PRAKTICKÉ
POUŽITELNOSTI KOMBINACE GPS A INERCIÁLNÍCH
SENZORŮ**

diplomová práce

Autor:

Ondřej FIALÍK

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan STANKOVIČ, Ph.D.

Ostrava 2008

Prohlášení

Celou diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).

Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v abstraktu, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

Rovněž souhlasím s tím, že kompletní text diplomové práce bude publikován v materiálech zajišťujících propagaci VŠB-TUO, vč. příloh časopisů, sborníků z konferencí, seminářů apod. Publikování textu práce bude provedeno v omezeném rozlišení, které bude vhodné pouze pro čtení a neumožní tedy případnou transformaci textu a dalších součástí práce do podoby potřebné pro jejich další elektronické zpracování.

Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 30.4.2007

.....

podpis autora

Ondřej FIALÍK
G. Preissové 13
69501 Hodonín

Anotace diplomové práce

Diplomová práce se zabývá testováním a vyhodnocením praktické použitelnosti kombinace GPS a inerciálních senzorů. Praktické testy byly provedeny na modulu MNAV100CA od firmy Crossbow, které je kombinací GPS přijímače a inerciálního modulu. Jde zde o seznámení s problematikou inerciální navigace, inerciálních senzorů a jejich použití. Je zde uvedena vytvořená metodika testování. Poté jak uvést daný modul do chodu, spojit jej s počítačem a navázat spojení a komunikaci s procesorovou platformou Stargate. Po naměření podle sestavené metodiky byly hodnoty zpracovány a z výsledných dat zhodnocena použitelnost tohoto zařízení.

Klíčová slova: Inerciální navigace, INS, GPS, gyroskop, akcelerometr

Annotation of thesis

The diploma thesis deals with testing and evaluation of practical use of GPS and inertial sensors combination. Practical tests were done on MNAV100CA module - an electronic device from Crossbow Company. It is a combination of GPS receiver and inertial system (IMU). At the beginning there is an introduction to the inertial navigation, inertial sensors and their usage. A description of methodology and of testing procedure follows. Technical part describes how to launch and use the IMU module or how to join module with PC. Connection and communication with processor platform Stargate is also described. Usability of the IMU device was evaluated from final data, which were captured according to the proposed methodologies.

Keywords: Inertial navigation, INS, GPS, gyroscope, accelerometer

Obsah

Seznam použitých zkratek	1
1 Teoretický úvod.....	3
1.1 Inerciální navigace	3
1.1.1 Druhy inerciálních systémů	4
1.2 Inerciální snímače	4
1.2.1 Akcelerometry	4
1.2.2 Gyroskopy.....	5
1.2.2.1 Mechanický gyroskop.....	6
1.2.2.2 Elektronický gyroskop.....	7
1.2.2.3 Optický gyroskop.....	8
1.3 Chybovost INS.....	9
1.4 Integrace INS a GPS	10
1.4.1 Využití integrovaných GPS/INS systémů.....	12
1.4.2 Strapdown systém	13
1.5 Kalmanova filtrace.....	15
1.5.1 Výpočet Kalmanova filtru	15
1.5.1.1 Predikční část.....	15
1.5.1.2 Aktualizační část.....	16
1.5.2 Použití Kalmanovy filtrace	17
1.6 Technické vybavení	18
1.6.1 Modul MNAV100CA	18
1.6.1.1 Technická data	18
1.6.2 Stargate modul	19
1.6.2.1 Technická data	20
1.6.2.2 Procesorová deska (Processor Board).....	20
1.6.2.3 Daughter Card (karta s konektory)	21
1.7 Programové vybavení	21
1.7.1 MICRO-VIEW.....	21
1.7.2 PuTTY 0.60	22
1.7.3 Embedded Linux BSP.....	23

1.7.4	MNAV 1.5	23
2	Metodika měření	24
2.1	Statická.....	24
2.2	Dynamická – stálá.....	25
2.2.1	Pohyb po kružnici	25
2.2.2	Pohyb po přímce	26
2.3	Dynamická – variabilní.....	27
3	Příprava měření	29
3.1	Modul MNAV100CA	29
3.1.1	Spuštění modulu	29
3.1.2	Kalibrace modulu.....	30
3.2	Modul Stargate+MNAV100CA.....	30
3.2.1	Spuštění zařízení	31
3.2.1.1	Nastavení programu PuTTY	31
3.2.1.2	Nastavení operačního systému modulu Stargate	32
4	Měření a jeho výstupy	33
4.1	Spuštění měření.....	33
4.2	Měření první metodou (statická).....	34
4.2.1	První měření.....	36
4.2.2	Druhé měření	39
4.2.3	Třetí měření.....	42
4.3	Měření druhou metodou (dynamická – stálá)	45
4.3.1	První měření.....	46
4.3.2	Druhé měření	49
4.3.3	Třetí měření.....	52
4.4	Měření třetí metodou (dynamická – variabilní)	54
4.4.1	První měření.....	54
4.4.2	Druhé měření	58
4.4.3	Třetí měření.....	60
5	Kooperace s robotem	63
6	Závěr	65
	Seznam obrázků, grafů a tabulek.....	66
	Použitá literatura	69
	Přílohy	72

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Výklad
CF	CompactFlash – je typ zařízení pro ukládání dat používaný v přenosných elektronických zařízeních.
EXT2	Jde o open source souborový systém užívaný například v Linuxu.
FAT	File Allocation Table – je to jednoduchý souborový systém obsahující informace o obsazení disku.
GPS	Globální družicový navigační systém založený na 24 družicích obíhajících kolem Země ve výšce cca. 20 200 km a poskytující velice přesné, celosvětově dostupné informace pro potřeby určování polohy a navigace. [2]
HDD	Hadr Disk Drive – tzv. pevný disk, médium pro ukládání dat v počítačích.
INS	Inerciální navigační systém
JTAG	Joint Test Action Group – standard pro testování plošných spojů, programování FLASH pamětí, apod.
KML	Keyhole Markup Language – speciální značkovací jazyk používaný především pro vizualizaci geografických dat
LED	Elektroluminiscenční dioda je elektronická polovodičová součástka obsahující

	přechod P-N.
MB	Megabajt = milion bajtů - jednotka množství informace
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanické Systémy integrují mechanické elementy, senzory, akční členy a elektroniku na křemíkovém substrátu.
PIN	Kovový hrot, nacházející se většinou ve skupinách o 2 a více členech. Na tyto hroty se umísťují jumpery.
RS – 232	Standard definující asynchronní sériovou komunikaci pro přenos dat.
SSH	Secure Shell – je klient/server protokol, který umožňuje bezpečnou komunikaci mezi dvěma počítači pomocí transparentního šifrování přenášených dat.
TCP	Transmission Control Protocol – je jedním ze základních protokolů sady protokolů Internetu, konkrétně představuje transportní vrstvu. Protokol garantuje spolehlivé doručování a doručování ve správném pořadí.
USB	Universal Serial Bus – univerzální sériová sběrnice.

1 Teoretický úvod

1.1 Inerciální navigace

Metoda nazývaná inerciální navigace je proces, při kterém se za pomoci inerciálních senzorů, jako jsou gyroskopy a akcelerometry provádí měření, jehož hodnoty slouží pro výpočet postupného pohybu zařízení (vozidla, letadla, ponorky, rakety...) v rámci vnitřního inerciálního systému souřadnic. Tato technologie byla patentována v roce 1910 v Německu a později používána např. k navigaci raket V-1 a V-2.

Inerciální navigační systém se skládá z měřicí jednotky obsahující akcelerometry a gyroskopy a z navigačního počítače, který vyhodnocuje data z měřících zařízení. Na rozdíl od všech ostatních navigačních systémů, je inerciální navigace zcela soběstačná a nezávislá na okolním prostředí, tj. systém nepotřebuje vnější objekty jako například družice a je odolný vůči vnějším vlivům jako je počasí, magnetické poruchy, elektronické rušení a zkreslení signálu. [11]

Výpočtové operace v inerciálním navigačním systému jsou založeny na Newtonově pohybovém zákonu. Z tohoto zákona vyplývá, že vyprodukovaná síla je přímo úměrná zrychlení tělesa. Dle dané závislosti je možné vypočítat změnu rychlosti a pozice v čase. Zrychlení pohybu, respektive síla vznikající při změnách rychlosti pohybujícího se předmětu a gravitační zrychlení, síla vzniklá působením gravitace (přitažlivosti) Země, jsou zaznamenávány inerciálními senzory známými jako akcelerometry. Pro účel navigace v souřadnicovém systému je nezbytné dodržení směru pohybu ve směru zrychlení. Což je prakticky nemožné, a proto se používají pro zjištění rotačního pohybu (náklonu) senzory zvané gyroskopy. Jsou to přístroje obsahující rychle se otáčející setrvačnick, využívající jedné důležité vlastnosti a to rotujícího setrvačnicku – setrvačnick nemění při rotaci svou polohu a tím dává informaci o orientaci v prostoru. [22]

Vzhledem k tomu, že každý volný objekt v prostoru má šest stupňů volnosti (vnitřní vzájemně nezávislé proměnné), tak se obvykle inerciální navigační systém

skládá ze tří gyroskopů a tří akcelerometrů, kde každá dvojice (gyroskop, akcelerometr) je schopna zaznamenat rotaci či zrychlení ve směru jedné osy kolmé na zbylé. Z šesti stupňů to jsou tři lineární stupně volnosti a to posun v ose x, y a z – ty udávají pozici objektu a tři stupně volnosti rotace a to otočení kolem osy x, y a z (Θ , ψ , φ) – ty udávají polohu objektu. Pokud je známo těchto šest proměnných, je známá i poloha objektu. Jsou-li tyto údaje sledovány po jistou dobu, je z nich možné určit dráhu a rychlost pohybu objektu.[19]

1.1.1 Druhy inerciálních systémů

Existují dva základní přístupy k inerciální navigaci. První z nich používá kardanový systém, který využívá gyroskopicky stabilizovanou platformu pro vyvážení senzorů s předdefinovaným referenčním rámem. Jejich výhodou je to, že na ně působí menší síly a je snadnější vypočítat aktuální pozici. Mají nižší spotřebu energie.

Bezcardanový inerciální navigační systém používá plošinu pevně spojenou s vozidlem a levné inerciální senzory, tedy akcelerometry a gyroskopy v podobě integrovaných obvodů, což způsobuje příklon především k této technologii. [12]

1.2 Inerciální snímače

1.2.1 Akcelerometry

Jsou to v dnešní době velmi používané snímače. Primární veličinou, kterou akcelerometry snímají je zrychlení. Akcelerometry jsou schopny měřit zrychlení jak dynamické, tak gravitační. Statické zrychlení je již ze svého principu neustále přítomné a je ho tedy nutné při měření dynamického zrychlení ve výsledcích odstranit filtrací. Senzory mohou měřit od velmi nízkých hodnot g, ale dokáží vydržet nárazově i hodnoty v okolí 1000g.

Oblasti užití akcelerometrů lze rozdělit například na:

- detekce pádu (ochrana HDD)
- stabilizace obrazu
- navigace
- kontrola rovnováhy přístrojů

- monitorování seismické aktivity.
- detekce nárazu (airbagy)
- dynamická kontrola vozidla (brzdové systémy)
- rehabilitační přístroje
- pedometry
- zařízení pro sportovní lékařství
- atd.

Akcelerometry lze rozdělit, jednak podle toho kolik mají citlivých os a to na akcelerometry jednoosé, dvouosé a tříosé, nebo na akcelerometry se seismickou hmotou a MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) akcelerometry s proměnou kapacitou.

Rozdělení akcelerometrů:

- Se seismickou hmotou
 - piezoelektrické akcelerometry (PE) – využívají piezoelektrický krystal (přírodní nebo keramiku), který generuje náboj úměrný působící síle, která při zrychlení působí na každý objekt
 - piezorezistivní akcelerometry (PR) – využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu
- MEMS technologie
 - akcelerometry s proměnnou kapacitou (VC) – využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně kapacity

1.2.2 Gyroskopy

Jsou to snímače, které se používají k stanovení úhlové rychlosti a velikosti rotace.

Jejich užití je pestré např. k:

- měření náklonu
- zpřesňování GPS

- stabilizace obrazu nebo předmětů
- zjišťování změny polohy nebo pohybu
- měření setrvačnosti
- atd.

Základním vztahem popisujícím chování gyroskopu je

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{dI\vec{\omega}}{dt} = I\vec{\alpha}$$

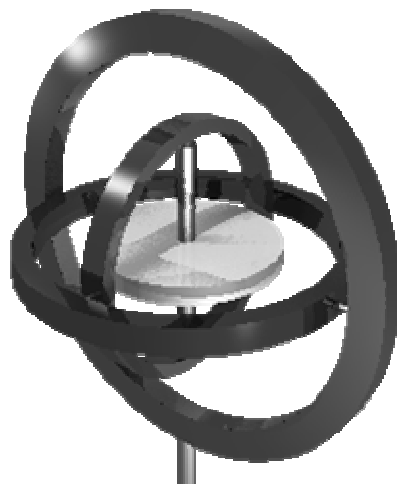
, kde $\boldsymbol{\tau}$ a \vec{L} jsou vektory, respektive vektor točivého momentu gyroskopu a vektor úhlového momentu, skalár I je moment setrvačnosti, $\vec{\omega}$ je vektor úhlové rychlosti a $\vec{\alpha}$ vektor úhlového zrychlení.

Lze je rozdělit dle použitého fyzikálního principu na:

- Mechanické
- Kvantové
- Jaderné
- Elektrické
- Optické

1.2.2.1 Mechanický gyroskop

Gyroskop neboli též gyroteodolit je přístroj k přímému určování azimutů zvolených směrů. Je to těleso tvaru kovového prstence, nebo kovové desky rychle rotující kolem osy na toto těleso kolmé. Není-li gyroskop ovlivněn vnějšími silami, udržuje jeho rotační osa v prostoru stálý směr. Setrvačnický pohyb reaguje tak, že se snaží srovnat svou rotační osu s rotační osou Země. Stabilizovaný setrvačnický směr ukazuje k severu.



Obr. 1 Mechanický gyroskop

1.2.2.2 Elektronický gyroskop

Pracuje na technologii MEMS, což znamená, že kromě samotného snímače obsahuje ještě řadu vyhodnocovacích a řídicích obvodů. Výstupní signál může být jak analogový tak i digitální. Gyroskopy jsou vyráběné jako integrované MEMS obvody pracující na principu Coriolisovy síly, což značí, že umějí měřit pouze v jednom směru, a to je směr kolmý na plochu chipu. Pro jiné směry je nutné zajistit správné natočení a umístění součástky.

Coriolisova síla je tzv. virtuální síla, která působí na libovolný hmotný předmět či objekt, který se pohybuje rychlostí \mathbf{v} v soustavě rotující kolem osy rotace úhlovou rychlostí $\boldsymbol{\omega}$.

Platí zde vztah pro vektor Coriolisovy síly

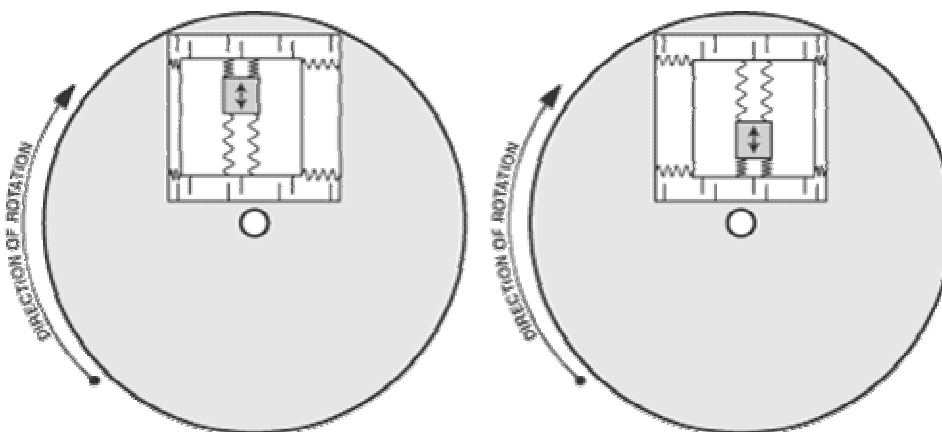
$$\vec{F}_c = 2m\vec{v} \times \vec{\omega}$$

, kde F_c je Coriolisova síla, m je hmotnost tělesa (kg), \mathbf{v} vektor rychlosti tělesa (m.s^{-1}), $\boldsymbol{\omega}$ je vektor úhlové rychlosti otáčení soustavy (rad.s^{-1}) a \times značí vektorový součin. Velikost Coriolisovy síly lze pak spočítat jako

$$F_c = 2mv\omega \sin \theta$$

, zde θ je úhel sevřený mezi vektorem úhlové rychlosti a vektorem rychlosti. V případě pohybu po Zemi se jedná o zeměpisnou šířku.

Coriolisova síla hraje podstatnou roli na Zemi díky její rotaci kolem vlastní osy. Každé těleso, které se po povrchu Země pohybuje rychlostí v , je vlivem Coriolisovy síly stáčeno od svého původního směru. Na severní polokouli stáčí tato síla všechna pohybující se tělesa směrem vpravo od původního směru, na jižní polokouli pak vlevo. Na rovníku je Coriolisova síla nulová.



Obr. 2 Ukázka působení Coriolisovy síly

Pohybuje-li se těleso na severní polokouli na východ, má Coriolisova síla směr síly odstředivé – těleso tedy ztrácí část své tíhy. Naopak při pohybu z východu na západ, má Coriolisova síla směr síly dostředivé, a tudíž těleso část tíhy „získává navíc“. [3] Toto dokazuje schéma funkce snímače na obrázku.

1.2.2.3 Optický gyroskop

Nemá na ně vliv gravitace, která je příčinou mnohých nedostatků u gyroskopů mechanických.

Optické gyroskopy jsou založeny na principu Sagnacova jevu a dají se rozdělit do dvou druhů:

- Laserové – při rotaci dochází na optické dráze ke změně frekvence
- Vláknové – při rotaci dochází na optické dráze k fázovému posunu

1.3 Chybovost INS

Jak již vyplývá z úvodu, měření je založeno na jednoduchém principu, avšak jeho praktická realizace je složitá. Ze zrychlení lze jednoduchými integracemi získat rychlost a z té dále integracemi polohu. Ovšem už do zrychlení vstupuje mnoho chyb vzniklých při měření a tyto chyby jsou bohužel postupně s integracemi integrovány do výsledků, kde se kumulují a s postupujícím časem narůstají.

Proto není inerciální navigace nekonečně přesná a po čase je nutné provést kalibraci vstupů, jinak ztrácí udávaná poloha vypovídací hodnotu.

Jako zdroje chyb se dají uvést:

- vychýlení, kolísání a jiné chyby na akcelerometrech či gyroskopech
- chyby v určení polohy, zrychlení nebo postavení snímače
- vychýlení senzoru z umístění na platformě
- odchylky při výpočtech gravitačního modelu
- aproximace v mechanismu systémového modelu

Chyby v inerciální navigaci lze zařadit do dvou kategorií, a to deterministické a stochastické (náhodné). Zatímco pro odstranění deterministických chyb existuje přesný matematický model, pro stochastické chyby se dá použít pouze aproximace pomocí statistické analýzy (pouze přiblížení k čisté hodnotě bez chyb). Deterministické chyby se dají jednoduše najít a odečíst z výstupních hodnot pomocí modelování. Ovšem v čase se měnící stochastické chyby například bílý šum (náhodný signál), náhodná výchylka či dráha jde pouze minimalizovat. Některé chyby jako například výchylka senzoru obsahují obě složky jak stochastickou tak deterministickou. [11]

Inerciální měření, určité síly a úhlová rychlost mohou být vyjádřeny jako:

$$l = L + b_l + S_l L + N_l L + \varepsilon_l$$

, kde l je hodnota inerciální měření, L inerciální pozorování, b_l výchylka měření, S_l diagonální matice stupnice hodnot, N_l je šikmost symetrické matice reprezentující výchylku os senzorů a ε_l je hodnota náhodného šumu.

Výchylka hodnot z akcelerometrů či gyroskopů je vždy nenulová a to, i pokud je systém statický. Výchylky jsou obvykle udávány v microgalech (mGal) pro akcelerometry a ve stupních za hodinu ($^{\circ}$ /hod) pro gyroskopy. Chyby stupnice hodnot jsou nelineární a asymetrické. Výchylky os senzorů ukazují na chyby vznikající při montáži senzorů, z čehož vyplývá nepřesné usazení senzorů do os souřadnicového systému. [11]

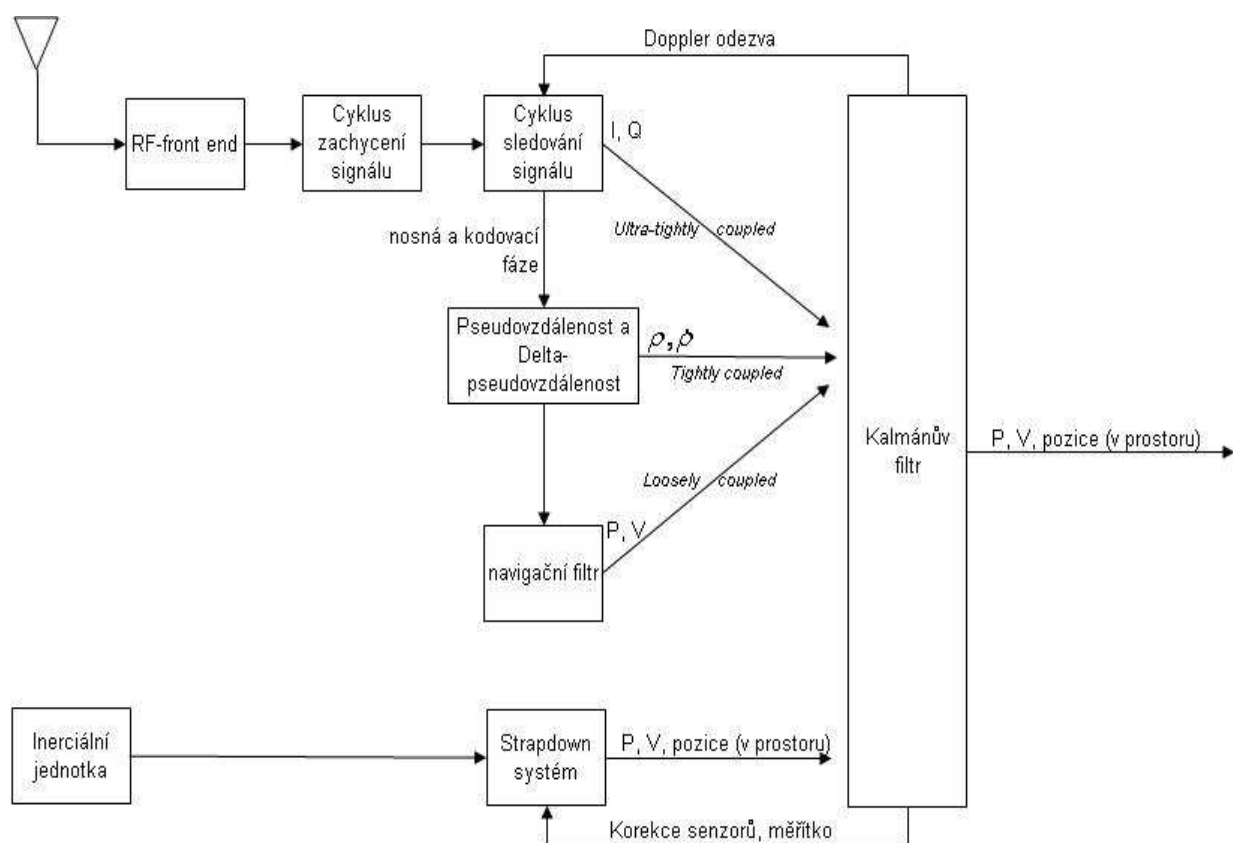
1.4 Integrace INS a GPS

Inerciální navigace je nezávislá na prostředí a okolních vlivech, ovšem potřebuje ještě jiný polohový systém, podle kterého by mohla dělat korektury chyb a hlavně fungovat v globální souřadnicové síti. Přijímač GPS je závislý na okolním prostředí, které mu může znemožňovat, či zkreslovat přijetí signálu z družic. Ovšem při dobrém signálu nedochází k nárůstu chyb.

U obou technologií se ukazují navzájem se doplňující vlastnosti, které jsou vhodné pro integraci těchto dvou systémů do jednoho poskytujícího přesnější a komplexnější navigaci. Tento robustní systém (GPS/INS) byl vyvinut právě proto, aby eliminoval nedostatky jednotlivých systémů, které mají, pokud fungují osamocně.

Typy integrovaných systémů INS/GPS lze rozdělit do kategorií podle toho, jaká data z jednotlivých částí zařízení jsou v celku použita. V průběhu času došlo k vývoji od systémové úrovně („loosely-coupled“ – volná dvojice), přes úroveň senzorovou („tightly-coupled“ – pevná dvojice), až k hardwarové systémové úrovni („ultra-tightly coupled“). Ve všech třech typech měření systému GPS kalibruje inerciální senzory a postupně upravuje chyby v jejich měření. [11]

V závislosti na typu architektury INS/GPS systém GPS dává rozdílné typy výstupních hodnot, které jsou i s hodnotami z inerciálních senzorů zpracovávány v mechanismu kalmanova filtru.



Obr. 3 Blokový diagram všech třech systémů INS/GPS

Systémová úroveň přistupuje k GPS a inerciální části jako ke dvěma nezávislým navigačním systémům. Obvykle je zde kalmanův filtr používán k integraci navigačních parametrů. Poloha (position – P) a rychlost (velocity – V) z obou systémů jsou zkombinovány v kalmanově filtru, který je pak dále schopen odhadnout chyby z inerciálních senzorů. GPS bráno jako samostatná jednotka potřebuje k tomu, aby byl systém schopen navigace v trojrozměrném prostoru nejméně 4 dostupné satelity. Pokud počet viditelných satelitů klesne pod toto minimum, není v integrovaném systému obnovována hodnota z GPS a celou navigaci přebírá inerciální jednotka do doby, než počet družic vzroste na požadovaný stav.

S rozvojem poznání v oblasti jednotlivých systémů a nových integračních technik, byl vyvinut sofistikovanější systém tightly-coupled. Zde je použito přesnějších GPS senzorů. Namísto rychlosti a polohy je zde brána vzdálenost (range – ρ) a delta vzdálenosti (delta ranges – $\delta\rho$) získané z přijímače, které jsou integrovány s hodnotami

měření z inerciální jednotky. Každý senzor je brán jako samostatný systém a jsou využívány všechny funkce a data, které jsou dostupné. Tento přístup poskytuje větší flexibilitu ve zpracování dat z GPS přijímače, protože inerciální navigační systém může předpovědět navigační parametry pro následující období a není při tom limitován minimálním počtem viditelných satelitů.

S dalším rozvojem techniky a vylepšením postupů byl navržen ultra-tight systém. Zde jsou hodnoty I a Q z korelátoru GPS přijímače použity pro výpočet v integračním filtru. Hlavní výhodou tohoto systému je, že šířka nosného pásma může být výrazně redukována, protože pomocí inerciálního senzoru může být odebrána složka hybnosti z GPS signálu, který vstupuje do cyklu. Toto zvyšuje kvalitu surového měření a k tomu ještě zvyšuje odolnost vůči rušení GPS signálu (tzv. anti-jamming). Efektivita systému závisí na kvalitě Dopplerovského odhadu odvozovaného z hodnot inerciálních senzorů. Se vzrůstajícím stupněm integrace se ovšem snižuje použití korelovaných hodnot z integračního filtru. [11]

1.4.1 Využití integrovaných GPS/INS systémů

- Mezinárodní vesmírná stanice
 - relativní navigace mezi orbitální stanicí a raketoplánem při přibližovacích a připojovacích manévrech. GPS signál totiž může být blokován nebo rušen konstrukcí vesmírné stanice.
- Vesmírná raketa (raketoplán)
 - pro vyhodnocení manévru na orbitě
 - při sestupu zpět na Zemi dojde zhruba ke dvanáctiminutovému výpadku GPS z důvodu ionizace, systém v této době zajišťuje navigaci
- Meziplanetární navigace
 - při misi na Mars bylo použito pro mapování pohybu modulu po planetě
- Navigace „městskými kaňony“
 - při pohybu vozidel v husté a vysoké městské zástavbě, popř. tunelech, podzemních garážích atd., kde je signál GPS stíněn nebo zkreslován

- Letecká fotogrametrie
 - v intervalech mezi aktualizací polohy při obnovení funkce systému GPS (polohové údaje INS jsou vloženy mezi posledním a obnoveným údajem GPS – jako "*vetknutý polygon*") a posléze při absolutním připojování snímkových dvojic
- Virtuální realita
 - gyroskopů je použito například ve virtuálních „helmách“, kde sledují pohyb hlavy a tím mohou posunout obraz promítaný na obrazovky uživatelových brýlí
- Gyrokompas
 - základní navigační zařízení u lodí a letadel ukazující opravdový sever (ne magnetický) Země
 - na rozdíl od běžného kompasu odolný vůči vnějším vlivům
- Umělý horizont
 - obdobný jako gyrokompas, ale pracující v jiné ose (horizontální)
 - používá se u letadel pro udržení horizontální polohy (autopilot) a její vizualizaci



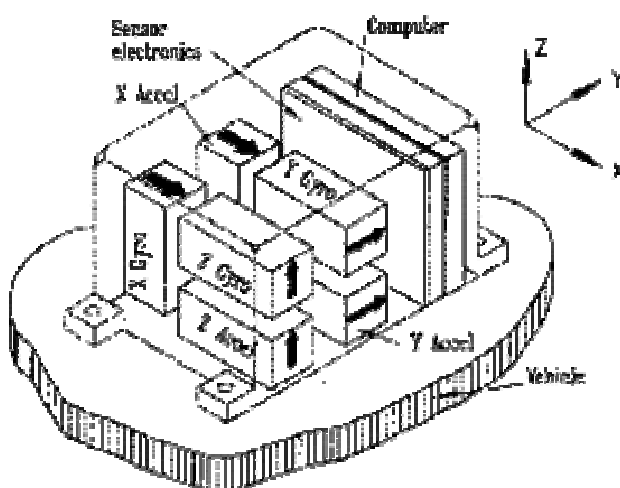
Obr. 4 Umělý horizont [22]

1.4.2 Strapdown systém

Jedná se o bezkardanový inerciální navigační systém, který je pevně spojen s tělem pohybujícího se zařízení. Tomuto systému dala možnost vzniknout evoluce ve výpočetní technice. Jedná se totiž o systém bez pohyblivých částí složený výhradně z elektrických či optických součástí.

Gyroskopy zde nefungují jako stabilizátory stálé polohy, ale jako zařízení k měření pohybu tělesa v prostoru. Systém tak vždy a v každém okamžiku ví, kterým směrem jsou osy akcelerometrů orientovány a mechanický systém závěsů je tím nahrazen systémem matematickým.

V porovnání gimbaled INS (akcelerometry zavěšeny v soustavě tří gyroskopicky stabilizovaných závěsů) proti strapdown systémům vykazuje každý z nich určité výhody i nevýhody. Zřejmě největší výhodou gimbaled systémů je jejich nižší chybovost. Jelikož jsou jejich tři ortogonální akcelerometry drženy v neměnné poloze, pouze jeden, který je orientován vertikálně, měří gravitační zrychlení a je tak zatížen chybami, které s gravitací souvisí. To je v kontrastu se strapdown systémy, jejichž všechny akcelerometry se pohybují a rotují v prostoru a každý z nich je tím ovlivněn gravitací a následnými chybami. Další výhodou gimbaled systémů je jednoduchost jejich gyroskopů. Hlavním úkolem gyroskopů v gimbaled systémech je jejich rotace, která zajišťuje velký moment setrvačnosti, zatímco gyroskopy ve strapdown systémech musí ve skutečnosti měřit protilehlé úhly pohybu. Hlavní výhodou strapdown systémů proti gimbaled je jednoduchost jejich mechanického provedení.



Obr. 5 Ukázka strapdown systému [4]

1.5 Kalmanova filtrace

Je to poměrně složitý nástroj sloužící k filtrování zašuměného stacionárního signálu. Dovoluje také odfiltrovat kvazistacionární signály jako například řeč bez nutnosti převodu do frekvenční oblasti.

Kalmanova filtrace je speciální matematický aparát (algoritmus) pro filtraci signálů v časové oblasti. Výhodou tohoto systému je schopnost získat čistý signál a hodnoty ze zašuměného signálu nebo jinak znehodnoceného souboru hodnot, i bez jakéhokoli poznatku o rušení. Prakticky lze takto matematicky zjistit hodnoty, které jsou přímým měřením těžko zjistitelné, protože se při samotném aktu měření do získaných hodnot indukují chyby měřících přístrojů nebo okolní působící šum a rušení. [10]

Ve zjednodušené podobě jde o predikční-estimační algoritmus, který se z předchozích a i následných budoucích dat snaží předpovědět průběh signálu, tedy vždy z průběhu minulých vzorků signálu vzorky následující. Ty jsou pak konfrontovány s opravdu naměřenými vzorky a jejich rozdíl se opět využívá k zlepšení odhadu dalších budoucích vzorků. [10]

1.5.1 Výpočet Kalmanova filtru

Průběh výpočtu Kalmanova filtru se dá rozdělit do dvou částí, které se neustále cyklicky opakují. Je to část předpovědi a druhou částí je aktualizace část. Predikční část používá odhad hodnot z předchozího časového kroku, pro výpočet odhadu hodnot času skutečného. V aktualizace části dochází k použití informací z aktuálního měření pro vytvoření jejich vyčištěné verze, která by měla tím pádem být přesnější než výchozí.

1.5.1.1 Predikční část

Pro predikované hodnoty platí vztah,

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_{k-1}$$

,kde $\hat{x}_{m|n}$ je odhad hodnot pro čas m s použitím hodnot času n , F_k je hodnota přechodového modelu a B_k je hodnota modelu kontrolního vstupu, který používá řídicí vektor u_{k-1} .

Dále je třeba vypočíst predikci odhadu kovariance, a to

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_{k-1}$$

, zde je $P_{m|n}$ chybová kovariační matice a Q_{k-1} je kovariance.

1.5.1.2 Aktualizační část

Inovace reziduí

$$\hat{y}_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}$$

, kde z_k jsou hodnoty pozorování a H_k hodnoty sledovací modelu.

Inovace kovariance

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k$$

, kde R_k je hodnota kovariance.

Optimální výsledek Kalmanova filtru

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1}$$

Aktualizace odhadu hodnot

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \hat{y}_k$$

A jako poslední aktualizace odhadu kovariance

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}$$

Tyto uvedené rovnice jsou použitelné pouze pro optimální hodnoty, pro jiné hodnoty je třeba použít komplexnějších rovnic.

1.5.2 Použití Kalmanovy filtrace

Obvykle se k dosažení přijatelné výkonnosti používá nepřímý (rozšířený) Kalmanův filtr, jehož stavy tvoří chyby inerciální měřicí jednotky. K dosažení výsledků blízkých optimálním je vyžadován filtr vysokého řádu, s nímž je spojena vysoká výpočtová náročnost vyplývající z nutnosti neustálé aktualizace tzv. Kalmanových zisků. Často se pak ke snížení výpočetního zatížení použijí pevné Kalmanovy zisky, což vede ke zhoršení kvality výsledků. Za účelem eliminace těchto je možné užít integrační přístup s tzv. přímým Kalmanovým filtrem. Přímý Kalmanův filtr je filtr, mezi jehož stavy se nachází pozice a rychlost zkoumaného tělesa. Základním prvkem navrhované integrace je zpracování všech různých nelineárních operací před Kalmanovou filtrací a přesunutí maximálního množství nezbytné dynamiky do vlastního filtru. Pochopitelně sofistikovanější modelování inerciálních chyb s rozšířeným Kalmanovým filtrem může zlepšit kvalitu výsledků, ale za cenu výpočetních nároků.

Kalmanova filtrace má dvě výhody:

- je schopna uskutečnit téměř stejně kvalitní filtraci v časové oblasti, jako jiné filtry pracující v oblasti frekvenční a proto není třeba pro převod do frekvenční oblasti použít často implementačně a na výpočetní výkon náročnou Fourierovu transformaci
- není zde nutné cokoli vědět o hledaném čistém (neporušeném) signálu ani o šumu a rušení, které na něj působily

Proto ji lze použít například pro:

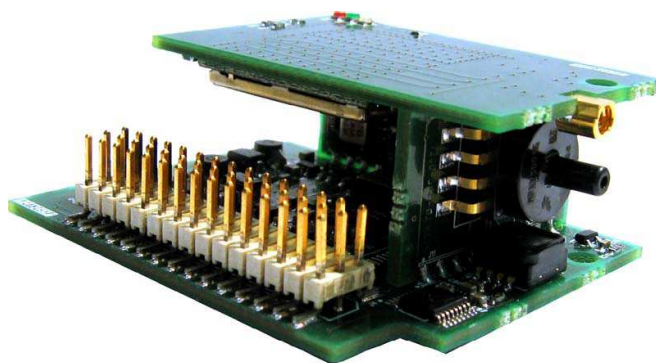
- řízení a navigaci
- zpřesnění měření
- odhad budoucnosti (z předchozích hodnot odhadne další průběh)
- filtraci zarušených stacionárních signálů
- odšumění kvazistacionárních signálů

1.6 Technické vybavení

V této kapitole budou popsány přístroje, které budou použity pro měření.

1.6.1 Modul MNAV100CA

Je to zařízení s kalibrovanými digitálními senzory a servy, vyvinuté firmou Crossbow pro navigaci a řízení malých pozemních či vzdušných robotických mechanismů.



Obr. 6 Modul MNAV100CA [16]

1.6.1.1 Technická data

Modul je napájen baterií o napětí 4,5V až 9V. Komunikuje s počítačem pomocí standardního sériového portu RS – 232.

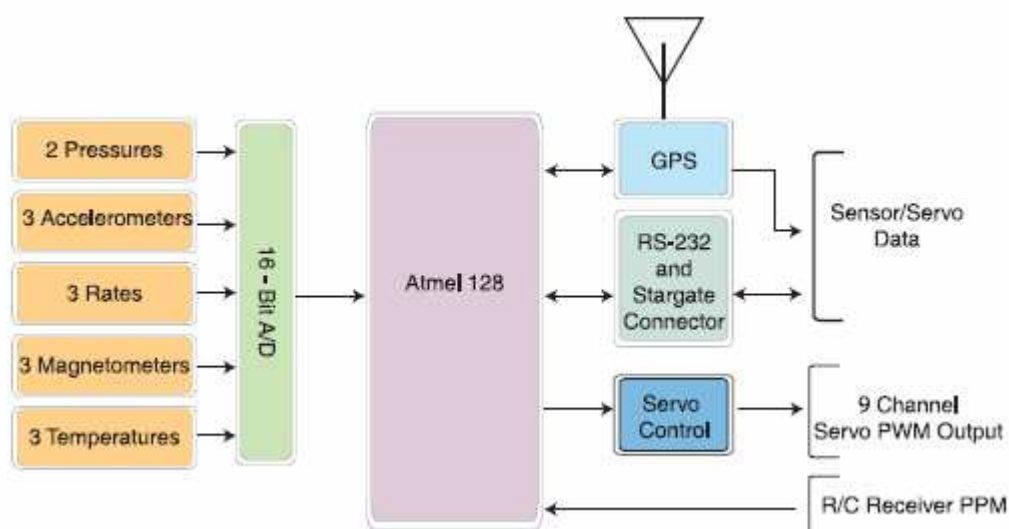
Je osazen celkem 14 digitálními senzory: 2 tlakoměry (statický a dynamický tlak), 3 akcelerometry, 3 rychloměry, 3 magnetometry, 3 teploměry. Dále se zde nachází výstup na připojení GPS antény, standardní 51-pinový konektor pro připojení napájení, komunikaci a ovládání serv a na spodní části konektor na spojení modulu MNAV100CA s modulem Stargate.

Rychlost aktualizace	2-100	Hz
Rozsah úhlového zrychlení	± 150	$^{\circ}/\text{sec}$
Přetížení	± 2	g

Šířka pásma inerciálních senzorů	> 25	Hz
Rozsah magnetometrů	$\pm 0,75$	G
Výškový dosah	5000	m
Max. operační rychlost vzduchu	80	m/s
Přesnost GPS	3	m
Operační teplota	-5 až +45	°C

Tab. 1 Specifikace modulu MNAV100CA

Modul je 33g těžký a má velikost 5,7 x 4,5 x 1,1 cm. Měřit je schopen úhlové zrychlení v rozmezí ± 150 °/sec s přetížením až 2g. Přesnost GPS antény je udávána 3m. Přesnost citlivosti akcelerometrů ADXL202JE udává jejich výrobce (Analog Devices, Inc.) 16%, samotnou citlivost pak 12,5 %/g.



Obr. 7 Schéma datové komunikace modulu MNAV100CA [16]

1.6.2 Stargate modul

Opět zařízení od firmy Crossbow s označením SPB400 – Stargate gateway, které je schopné komunikovat a zpracovávat data z modulu MNAV100CA.



Obr. 8 Stargate modul [21]

1.6.2.1 Technická data

Zařízení se skládá ze dvou částí, a to procesorové desky a desky s konektory, ta zajišťuje napájení modulu a komunikaci s okolím (tj. spojení modulu s počítačem pomocí sériového portu, připojení modulu do sítě, popřípadě připojení usb).

Na procesorovou desku je možné připojit modul MNAV100CA, který jí poté předává data k dalšímu zpracování a je z ní napájen.

1.6.2.2 Procesorová deska (Processor Board)

Její rozměry jsou 9,53 x 6,33 x 1,86 cm a hmotnost udává výrobce 47,5 g. Jsou zde 2 procesorové chipy Intel PXA255, Xscale® (400 MHz) a Intel SA1111, StrongARM®, ty zajišťují chod systému a zpracování dat. Paměť je o kapacitě 64 MB SDRAM plus 32MB FLASH. Na pevné flash paměti je předinstalován Embedded Linux BSP ten zaujímá 10MB z celkové kapacity. Na desce se dále nachází PCMCIA rozhraní, např. pro připojení Wi-Fi karty a také konektor Compact Flash pro možnost rozšíření kapacity pevné paměti.



Obr. 9 Procesorová deska modulu Stargate [20]

1.6.2.3 Daughter Card (karta s konektory)

Na desce o velikosti 6,33 x 5,08 x 1,52 cm a hmotnosti 40 gramů se nacházejí konektory pro komunikaci modulu s okolím. Je zde konektor pro napájecí adaptér (napájení v rozsahu 5 až 6V), sériový port, ethernetová zdířka, JTAG konektor a port pro USB konektor.



Obr. 10 Karta obsahující konektory (tzv. Daughter Card) [20]

1.7 Programové vybavení

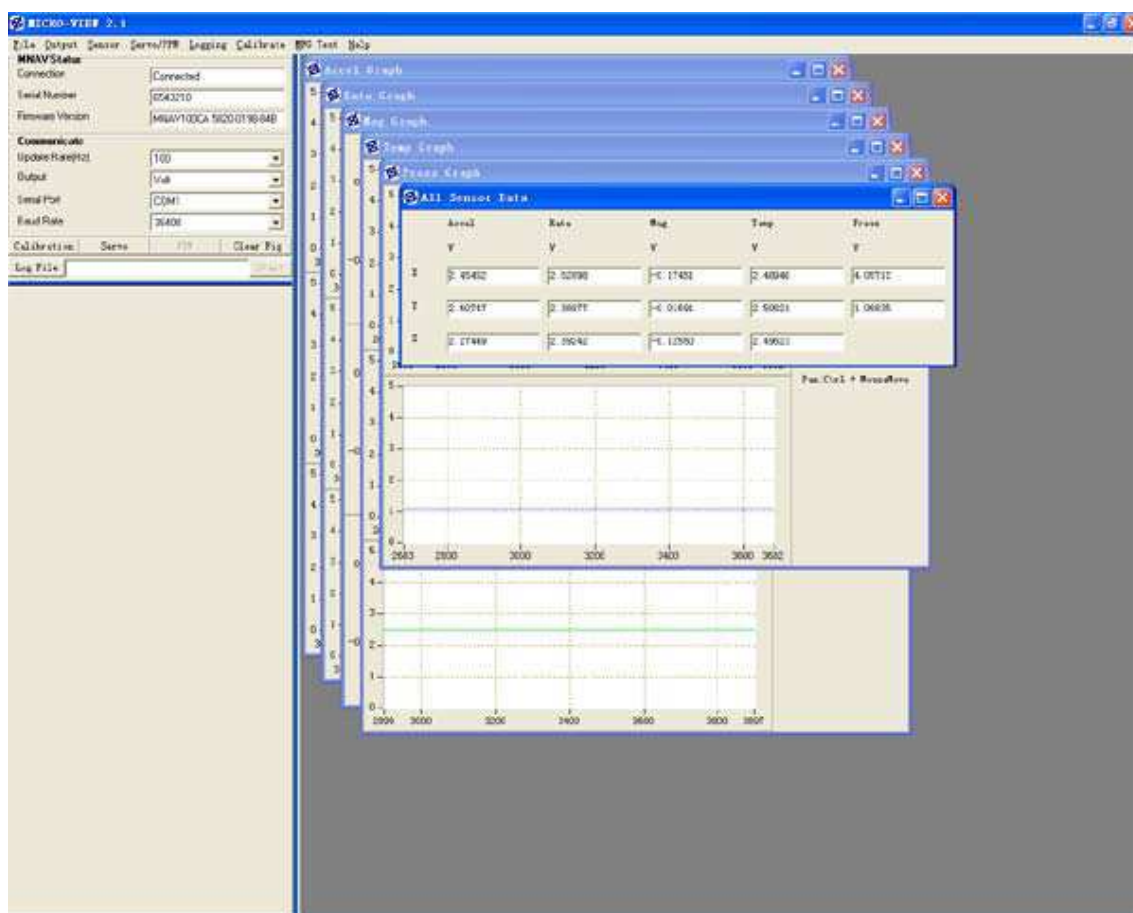
1.7.1 MICRO-VIEW

Pro vizualizaci, záznam pohybu, kalibraci a ovládání serv přes modul byl vyvinut program MICRO-VIEW (dnes ve verzi 2.1), který je volně dostupný na stránkách výrobce.

Program komunikuje s modulem pomocí sériového portu. Lze zde vybrat ze dvou módů vizualizace, a to Voltage Mode (data jsou předávána jako velikost

elektrického napětí na jednotlivých senzorech) nebo Scaled Mode (hodnoty jsou již přepočteny na standardní jednotky).

Aktuální pohyb lze sledovat jak v textové formě tak i jako grafické vyjádření. Data o pohybu i aktuální poloha získaná z GPS antény mohou být v reálném čase ukládány do textového souboru, ten je možno si znovu v tomto programu přehrát.



Obr. 11 Program MICRO-VIEW

1.7.2 PuTTY 0.60

Je to klient protokolů SSH, Telnet, rlogin a holého TCP. Vytvořen a vyvíjen Simonem Tathamem. PuTTY je svobodný software, šířený pod MIT licenci.

Je použit pro uskutečnění komunikace počítače s modulem Stargate. Je schopen se spojit přes COM port a umožňuje zadávání příkazů pomocí příkazové řádky.

Probíhá přes něj veškerá komunikace s modulem Stargate.

1.7.3 Embedded Linux BSP

Modul Stargate obsahuje zvláště upravenou verzi ARM Linuxu, která slouží pouze pro správu a ovládání tohoto modulu.

Bylo zde použito právě tohoto operačního systému vzhledem k nedostatku místa v paměti zařízení (32MB), má totiž možnosti být sestaven pouze z částí, které jsou zapotřebí a tím minimalizovat svou velikost (v našem případě 10MB).

1.7.4 MNAV 1.5

Program speciálně vytvořený pro získávání dat z modulu MNAV100CA, který je umístěn na platformě Stargate. Tento program vyvíjen Jung Soon Jangem je volně ke stažení na stránkách projektu MNAV Autopilot.

Jako výstup slouží tři textové soubory NAV.TXT (soubor obsahující data z výpočtu kalmanovým filtrem), GPS.TXT (soubor obsahující data získaná z GPS antény) a IMU.TXT(data ze senzorů)¹.

¹ Popis souborů je obsahem přílohy

2 Metodika měření

Vzhledem k tomu, že metodiky měření k podobným dostupným projektům byly pro daný účel nevhodné. Nalezené postupy jiných autorů byly nepoužitelné, protože se zabývali spíše zlepšením přesnosti navigace úpravou kalmanova filtru, nebo to byly testy, které se prováděli se zařízeními, ke kterým nebyl přístup, jako například pseudodružice. Proto bylo nutné sestavit metodiku novou, která by byla proveditelná dostupnými prostředky.

Byly vytvořeny tři kategorie: statická, dynamická – stálá, dynamická – variabilní. Aby se zamezilo náhodným odchylkám v měření, každá z metod bude provedena minimálně třikrát, nejlépe s co nejmenším časovým odstupem.

Metody byly zvoleny tak, aby bylo možné ověřit chování modulu za všech okolností. Metoda statická by měla zjistit, zda je modul schopen i bez pohybu udávat polohu s uspokojivou přesností. Druhá metoda, dynamická stálá, je pouze modelovou situací. V praktickém provozu je její zopakování takřka nemožné, neboť se jedná o periodicky se opakující pohyb o stabilní rychlosti. Na rozdíl od tohoto třetí test zcela kopíruje možnou situaci, která se děje při pohybu terénem, jedná se totiž o zcela nahodilý pohyb jak ve smyslu dráhy, tak i zrychlení, či rychlosti.

2.1 Statická

Inerciální modul bude umístěn na bod o známých souřadnicích, poté je třeba odpojit GPS anténu, čímž dojde ke spuštění pouze navigace za pomoci inerciálních senzorů. Zařízení bude ponecháno na tomto bodě po dobu 30 minut.

Výsledkem tohoto měření by měla být jen malá odchylka od původní polohy, která by měla přibývat geometrickou řadou.

Tato metoda by měla ukázat, zda je modul schopen udávat přesně danou polohu což by neměl být problém vzhledem k tomu, že se nepohybuje.

2.2 Dynamická – stálá

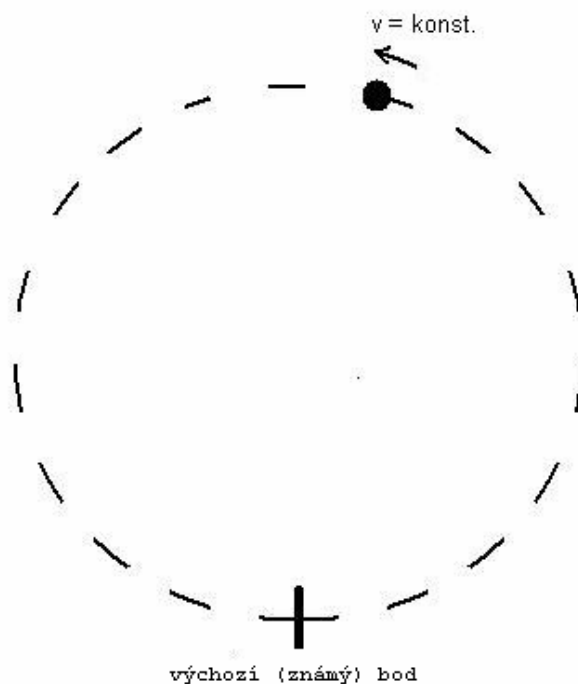
Zde se naskýtají dvě metody, a to pohyb po kružnici a pohyb po přímce.

2.2.1 Pohyb po kružnici

Modul bude namontován na mechanické robotické rameno, které je užíváno katedrou robotiky fakulty strojní, to je schopné dle nastavení udržet stejnou rychlost a stejnou dráhu po daný počet opakování.

Budou zjištěny souřadnice výchozí polohy ramena, poté bude anténa odpojena a zapnut pohyb ramena. Ten bude nastaven na konstantní rychlost s kruhovou dráhou pohybu. Z doby průchodu modulu bodem o známých souřadnicích bude poté zjištěna přesnost modulu, popř. výše odchylky a její růst v čase.

Vzhledem k tomu, že se modul bude pohybovat stejnou rychlostí po stejné dráze a tím na něj bude stále působit konstantní přetížení, měly by odchylky hodnot u tohoto testu narůstat tak jako u předchozí metody geometrickou řadou. Ovšem vzhledem k tomu, že už zde dochází k pohybu, měly by být odchylky větší než u předchozí metody.



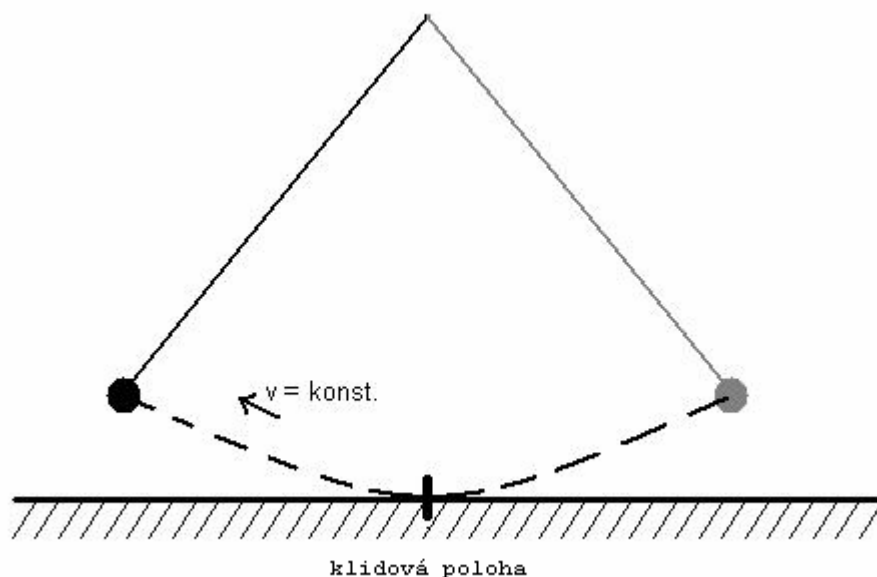
Obr. 12 Náčrt konstantního pohybu modulu po kružnici

Tato metoda je pouze modelovou situací, na které by mělo být zjištěno zda-li bude odchylka narůstat pravidelně, vzhledem k tomu, že se jedná o pravidelný opakující se pohyb tělesa (modulu).

2.2.2 Pohyb po přímce

V této metodě jde také o pohyb po stejné dráze ovšem v různé rychlosti, ta se nebude měnit nahodile, ale bude se konstantně snižovat.

Při tomto testu bude modul upevněn na závěs (čím bude závěs delší tím lépe), bude zjištěna poloha v klidové poloze, poté bude přístroj uveden do pohybu (rozhoupán). Je nutné zaznamenávat časy průchodů modulu nulovým (klidovým) bodem. Pro tyto časy budou vybrány data uvedené modulem a vyhodnoceny odchylky od výchozí polohy.



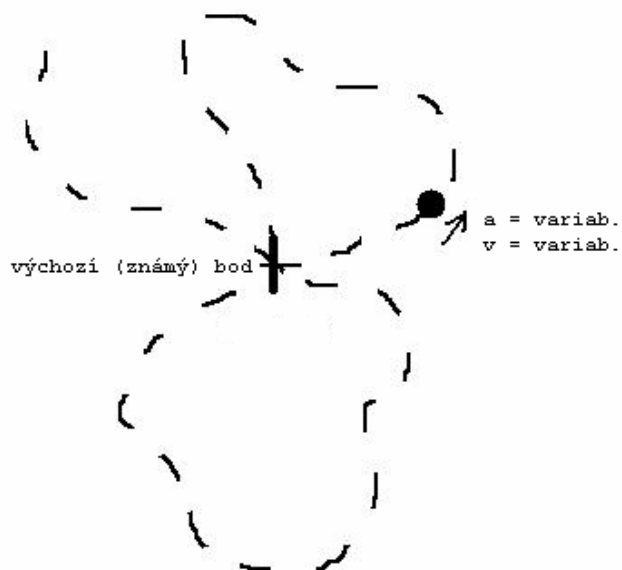
Obr. 13 Náčrt konstantního pohybu modulu po přímce

U této metody by měl nárůst odchylek více méně kopírovat pohyb modulu. Ze začátku měření by, vzhledem k vyšší rychlosti a tím pádem i vyššímu zrychlení, měl nárůst odchylky být větší, s ubývajícím rychlosti by se měl nárůst snižovat.

2.3 Dynamická – variabilní

Zde jde o zcela náhodný pohyb terénem. Zrychlení, rychlost i směr se bude měnit zcela náhodně. Aby bylo možné kontrolovat a zaznamenávat průběh přesnosti určování polohy za použití pouze inerciálních senzorů, bude opět zaměřen bod pomocí GPS (ten bude brán jako výchozí při měření). V průběhu měření bude trasa tento bod několikrát protínat (alespoň 50 průchodů za třicet minut měření). Vždy je třeba zaznamenat čas průchodu bodem, aby poté mohla být vyhodnocena tendence přesnosti měření.

Zde se jedná o zcela náhodný pohyb, proto předpokladem je, že u tohoto testu bude výsledná chybovost největší ze všech provedených měření.



Obr. 14 Náčrt variabilního pohybu

Tento test by měl, na rozdíl od předchozích modelových situací, již simulovat situace, které nastanou při pohybu v terénu. Jedná se o různé nahodilé pohyby ve všech osách. Měl by být závěrečnou zkouškou modulu, až zde se zcela ukáže jak je schopen modul reagovat a s jakou přesností je schopen udávat svou polohu při volném pohybu.

3 Příprava měření

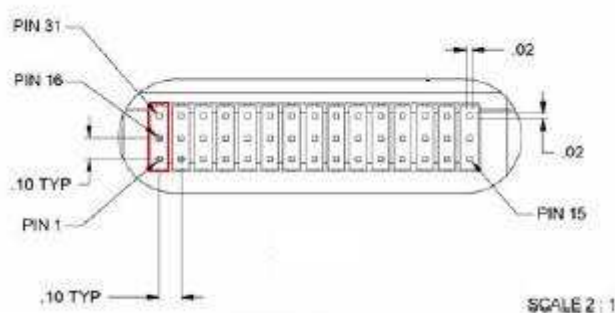
Před vlastním měřením je třeba modul na toto měření připravit. V této kapitole je uveden postup jak modul samotný i v kooperaci s platformou Stargate uvést do chodu a jak s těmito zařízeními komunikovat.

3.1 Modul MNAV100CA

Jako první bylo třeba otestovat a kalibrovat senzory samostatného modul MNAV100CA.

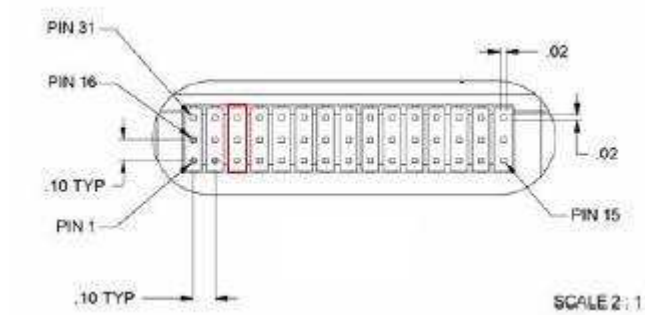
3.1.1 Spuštění modulu

Modul je napájen sadou baterií složenou ze 4 akumulčních monočlánků a ta byla připojena pomocí jumperu na PIN konektor (piny 1, 16, 31) podle instrukcí z manuálu k modulu.



Obr. 15 Schéma připojení napájení [16]

Komunikace s počítačem je zajištěna dodaným kabelem s koncovkou sériového portu. Do modulu byl opět zapojen dle manuálu na piny 3, 18 a 33.



Obr. 16 Schéma připojení kabelu se sériovým portem [16]

Poté je možné do příslušného konektoru zapojit dodanou GPS anténu. Na vrchní straně modulu jsou umístěny 3 LED diody indikující různé stavy modulu.

Zelená (svítí) – modul zapnut

Červená (svítí) – modul pracuje

Žlutá (bliká) – anténa připojena, souřadnice neznámé

Žlutá (svítí) – anténa připojena, souřadnice známy

3.1.2 Kalibrace modulu

Kalibraci je nutné provést, aby byly odstraněny chyby vznikající výrobními chybami, jako je například ne úplně přesné usazení měřících součástek ve směru os či jejich náhodné vychýlení.

Každý modul má svůj kalibrační list, který udává firemní kalibrační nastavení. Hodnoty uvedené na listu je poté nutné zkonfrontovat s hodnotami, které udává modul.

Pro kontrolu kalibračních údajů s kalibračním listem modulu bylo nutné použít program MICRO-VIEW. Tyto údaje se shodovaly, proto nebyla nutná nová kalibrace, která lze také v tomto programu provést.

3.2 Modul Stargate+MNAV100CA

Všechny tři části byly spojeny a zkompletovány v jeden celek.

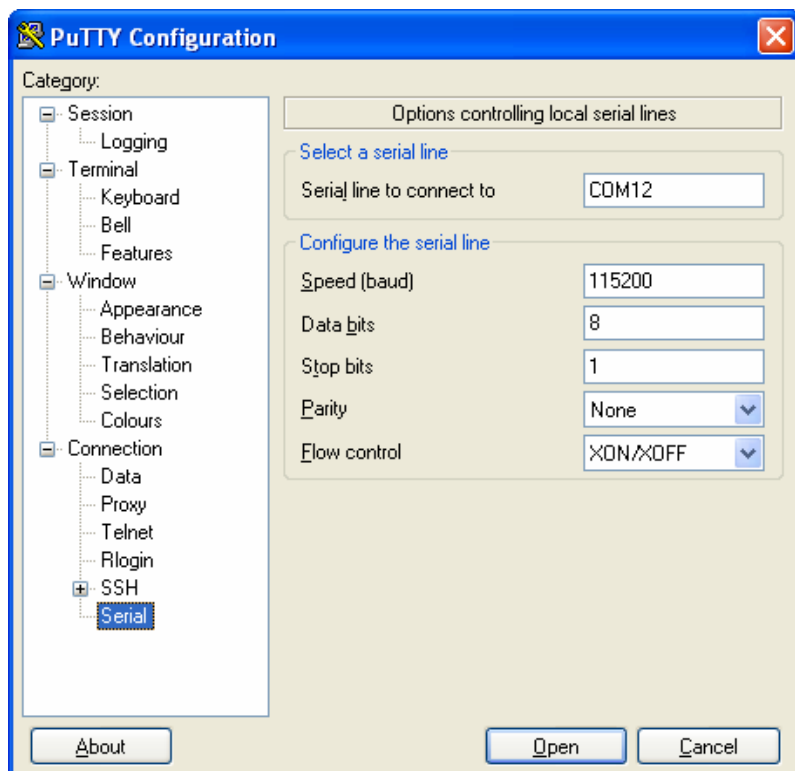
3.2.1 Spuštění zařízení

Pro napájení se používá dodaný adaptér o napětí 3,5V. Bohužel adaptér je vyroben pro použití v americké rozvodné síti, proto bylo nutné použít přechodový nástavec. Komunikaci lze zajistit buďto přes wi-fi rozhraní, síťový nebo sériový port.

Vzhledem k tomu, že jak pro síťové tak i pro wi-fi rozhraní je nutné provést nastavení, byla prvotní komunikace prováděna přes sériový kabel. Jelikož na počítači, který komunikoval s modulem, byl nahrán operační systém Windows XP, bylo zde nutné pro práci s ním nahrát program PuTTY. Ten umožňuje připojení a komunikaci přes sériový port.

3.2.1.1 Nastavení programu PuTTY

V nabídce Serial je třeba uvést číslo portu, na němž bude probíhat komunikace (v mém případě COM12). Zbylé pole pak byly vyplněny podle pokynů v manuálu k modulu Stargate, tzn. rychlost 115200 baud, data 8bit atd.



Obr. 17 Nastavení programu PuTTY

Po nastavení všech položek již je možné otevřít komunikační kanál mezi počítačem a modulem.

3.2.1.2 Nastavení operačního systému modulu Stargate

Po přihlášení dle přihlašovacích údajů z manuálu (login: root, password: rootme) se objevila příkazová konzole předinstalovaného operačního systému.

Aby mohlo být zahájeno měření, bylo třeba na CF kartě spustit program MNAV 1.5, který tam bylo nutno nahrát. Zde se vyskytl problém, systém nebyl schopen s kartou komunikovat. Karta totiž byla formátována v souborovém systému FAT, oproti tomu operační systém vyžaduje formátování EXT2. Tento problém byl odstraněn úpravou dat v souboru `ide.opts`, který se nachází v systému v umístění `/etc/pcmcia/`. V položce `FSTYPE` byla přepsána hodnota `EXT2` na `VFAT`, a do položky `OPST` bylo doplněno `uid=501,gid=501`.

```
case "$ADDRESS" in
*,*,*,1)
    INFO="CFCard ext2 setup"
    DO_FSTAB="n" ; DO_FSCK="n" ;
DO_MOUNT="y"
    FSTYPE="vfat"
    OPTS="uid=501,gid=501,mode=777,noatime"
    MOUNTPT="/mnt/cf1"
```

Obr. 18 Ukázka upraveného souboru `ide.opts`

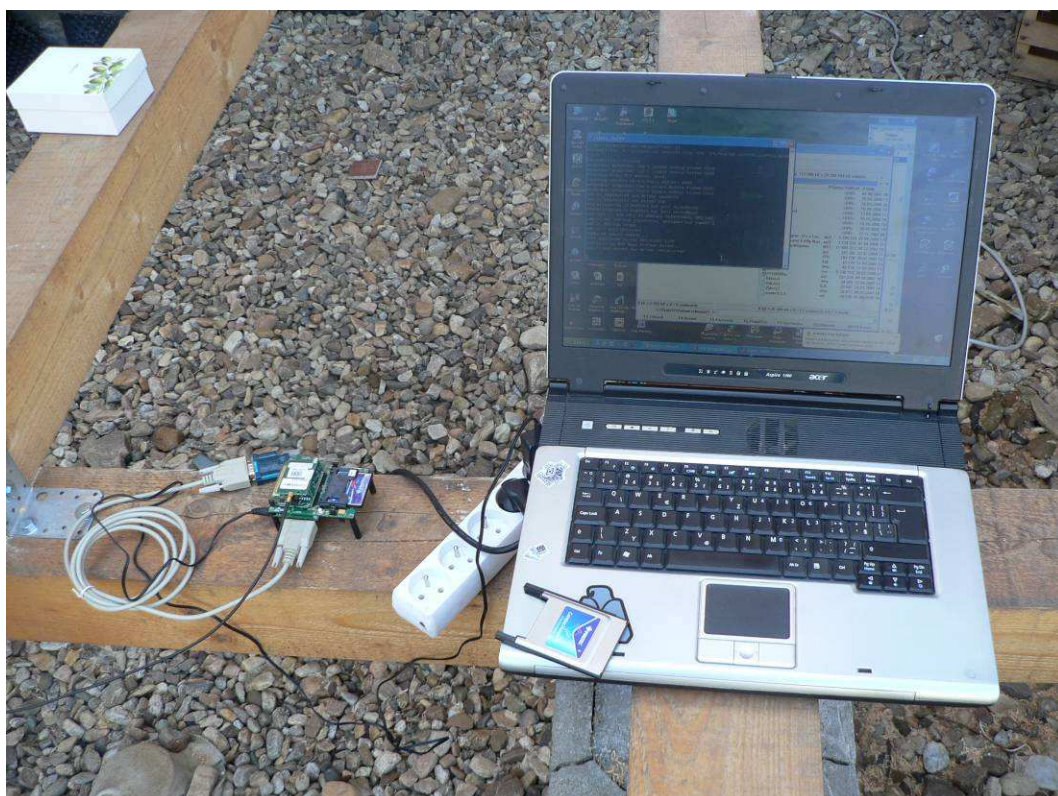
Po upravení a uložení souboru byla již karta systémem bez problémů automaticky načtena.

4 Měření a jeho výstupy

Tato část by měla probíhat dle již dříve uvedené a sestavené metodiky.

4.1 Spuštění měření

Samotné měření se spouští souborem `avionics`, ten se nachází ve složce programu MNAV 1.5. Při použití atributu `-save on(tzn. avionics -save on)` se data měření ukládají do kořenového adresáře CF karty tj. `/mnt/cf1/`, pokud by chtěl uživatel změnit úložiště je třeba modifikovat soubor `avionics.c`. Data se ovšem ukládají do normálně nečitelného formátu `.dat`, přeložení je třeba zajistit spuštěním souboru `decoder`, taktéž obsaženého ve složce MNAV 1.5, ten přeloží soubory `.dat` do formátu `.txt` a uloží je na stejné místo.

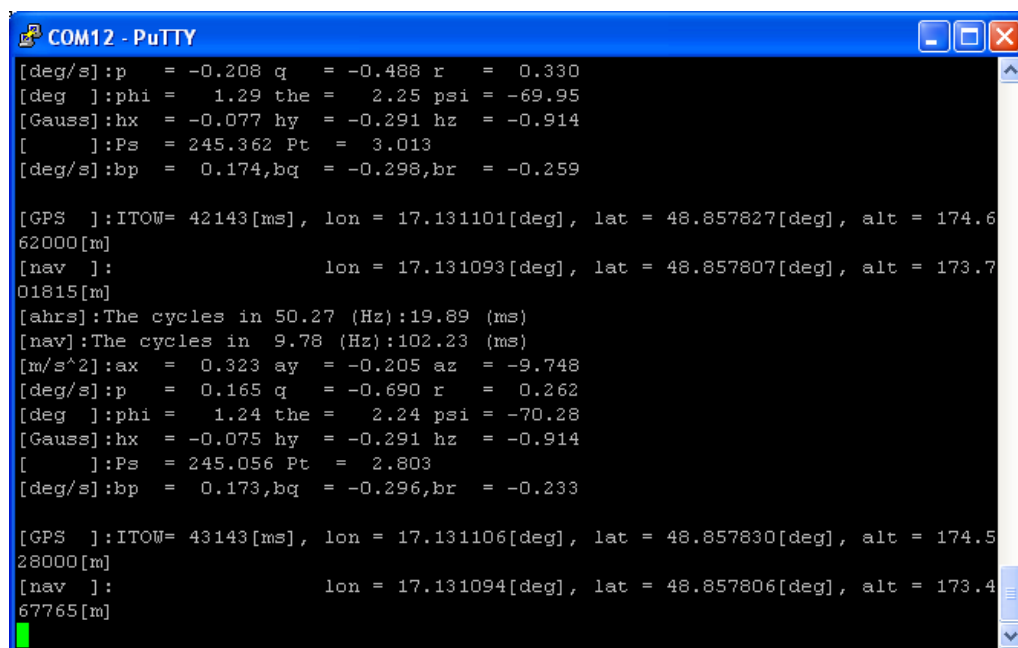


Obr. 19 Příprava na měření

4.2 Měření první metodou (statická)

Modul byl přichystán k měření, za pomoci antény byly zjištěny a načteny polohové souřadnice místa. Poté byla GPS anténa vypojena a měření dále pokračovalo pouze z dat z inerciálních senzorů a dopočtu za pomoci kalmanova filtru.

Původně bylo jedno měření naplánováno na dobu 30 minut, avšak z pohledu na výstupní data bylo zřejmé, že odchylka je již po několika málo minutách velká, proto bylo měření zkráceno do 5 minutového intervalu.



```
COM12 - PuTTY
[deg/s]:p = -0.208 q = -0.488 r = 0.330
[deg ]:phi = 1.29 the = 2.25 psi = -69.95
[Gauss]:hx = -0.077 hy = -0.291 hz = -0.914
[ ]:Ps = 245.362 Pt = 3.013
[deg/s]:bp = 0.174,bq = -0.298,br = -0.259

[GPS ]:ITOW= 42143[ms], lon = 17.131101[deg], lat = 48.857827[deg], alt = 174.6
62000[m]
[nav ]: lon = 17.131093[deg], lat = 48.857807[deg], alt = 173.7
01815[m]
[ahrs]:The cycles in 50.27 (Hz):19.89 (ms)
[nav]:The cycles in 9.78 (Hz):102.23 (ms)
[m/s^2]:ax = 0.323 ay = -0.205 az = -9.748
[deg/s]:p = 0.165 q = -0.690 r = 0.262
[deg ]:phi = 1.24 the = 2.24 psi = -70.28
[Gauss]:hx = -0.075 hy = -0.291 hz = -0.914
[ ]:Ps = 245.056 Pt = 2.803
[deg/s]:bp = 0.173,bq = -0.296,br = -0.233

[GPS ]:ITOW= 43143[ms], lon = 17.131106[deg], lat = 48.857830[deg], alt = 174.5
28000[m]
[nav ]: lon = 17.131094[deg], lat = 48.857806[deg], alt = 173.4
67765[m]
```

Obr. 20 Ukázka běžícího měření

25	48.8569709144	17.1271855495	456.953	0.192	0.140	0.012	1	23.795411
26	48.8569710915	17.1271857482	456.951	0.197	0.141	0.018	1	23.897901
27	48.8569712484	17.1271857947	456.956	0.145	0.140	0.004	1	24.030927
28	48.8569713823	17.1271859927	456.955	0.148	0.139	0.011	1	24.098360
29	48.8569715712	17.1271860985	456.958	0.141	0.158	0.003	1	24.231045
30	48.8569716991	17.1271863202	456.957	0.141	0.157	0.010	1	24.297398
31	48.8569718206	17.1271865308	456.956	0.140	0.157	0.016	1	24.395288
32	48.8569720148	17.1271866873	456.959	0.149	0.178	0.003	1	24.533664
33	48.8569721447	17.1271869238	456.958	0.151	0.174	0.010	1	24.595034
34	48.8569724028	17.1271870906	456.961	0.221	0.179	0.003	1	24.733112
35	48.8569725952	17.1271873301	456.960	0.222	0.178	0.010	1	24.795250
36	48.8569727976	17.1271875793	456.958	0.222	0.177	0.019	1	24.897595
37	48.8569730313	17.1271877315	456.962	0.184	0.171	0.004	1	25.031058
38	48.8569731984	17.1271879732	456.960	0.182	0.171	0.012	1	25.098370
39	48.8569734636	17.1271881897	456.963	0.172	0.179	0.003	1	25.231871
40	48.8569736213	17.1271884427	456.961	0.175	0.180	0.010	1	25.297423
41	48.8569737733	17.1271886844	456.960	0.176	0.181	0.015	1	25.395304
42	48.8569741117	17.1271889800	456.963	0.207	0.189	0.004	1	25.533689
43	48.8569742919	17.1271892331	456.962	0.208	0.188	0.012	1	25.595028
44	48.8569746759	17.1271896154	456.964	0.236	0.234	0.003	1	25.738148
45	48.8569748802	17.1271899297	456.962	0.235	0.236	0.013	1	25.795831
46	48.8569750942	17.1271902608	456.960	0.235	0.235	0.021	1	25.897583
47	48.8569755730	17.1271907622	456.963	0.322	0.303	0.005	1	26.031037
48	48.8569758690	17.1271911913	456.962	0.323	0.304	0.011	1	26.098322
49	48.8569763689	17.1271917424	456.964	0.391	0.371	0.004	1	26.230942
50	48.8569767272	17.1271922640	456.963	0.392	0.371	0.011	1	26.297433
51	48.8569770695	17.1271927605	456.961	0.394	0.371	0.020	1	26.395266

Obr. 21 Ukázka výstupního textového souboru nav.txt

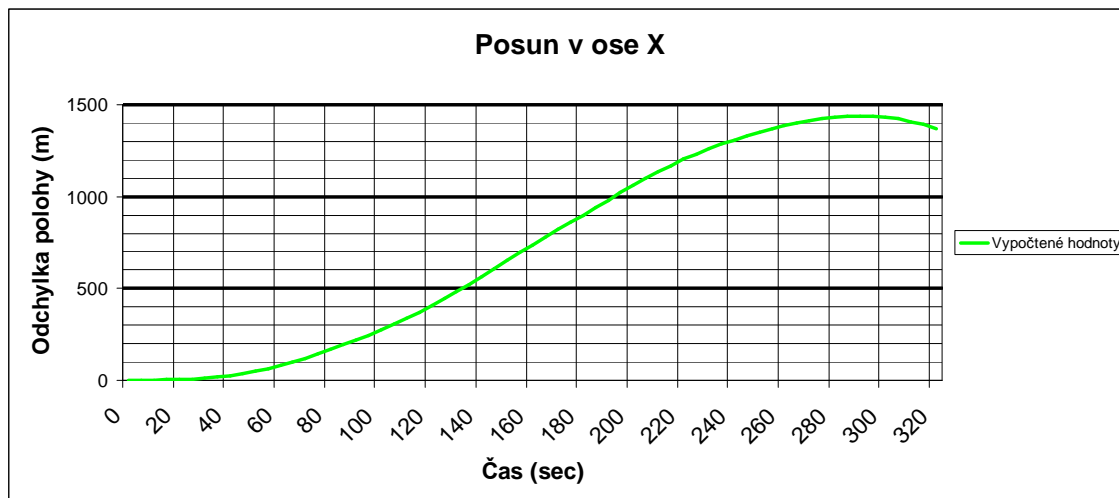
Výstupní soubor nav.txt² byl převeden do tabulky pro možnost dalšího zpracování v programu Microsoft Office Excel. V tomto programu byly z data dále zpracovány a byly zde vytvořeny grafy.

Za dobu jednoho měření (cca 5 minut) bylo výstupem přes 3000 řádků hodnot. Program Microsoft Office Excel pro grafický výstup je schopen použít maximálně 250 hodnot, proto byla udělána z každých 50 řádků průměrná hodnota, se kterou se dále pracovalo a která byla vizualizovaná.

Pro všechna měření budou brány hodnoty ze souboru nav.txt a to z 1 až 3250 řádku. Osa Y bude mít maximum vždy v hodnotě nejbližší nejvyšší odchylce daného měření.

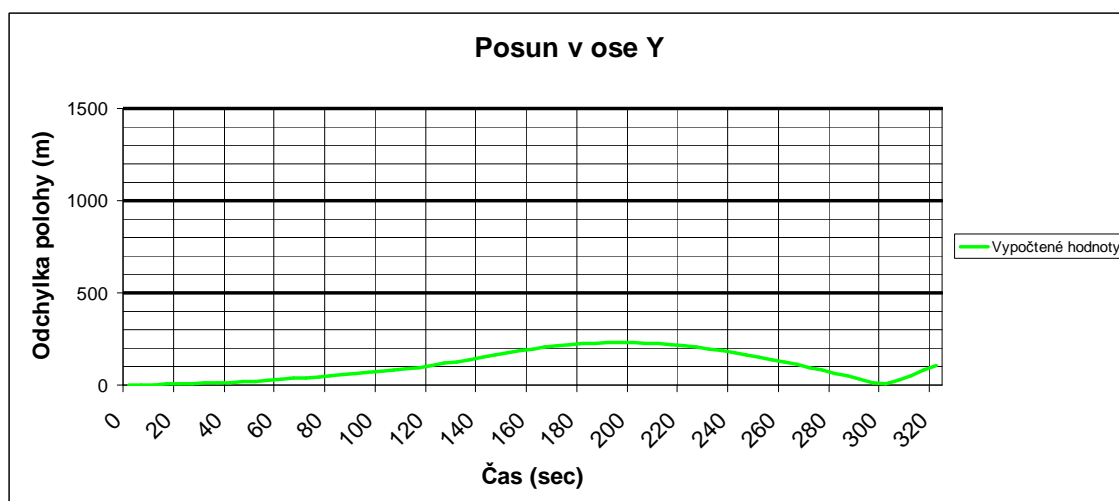
² Struktura souboru je uvedena v příloze

4.2.1 První měření

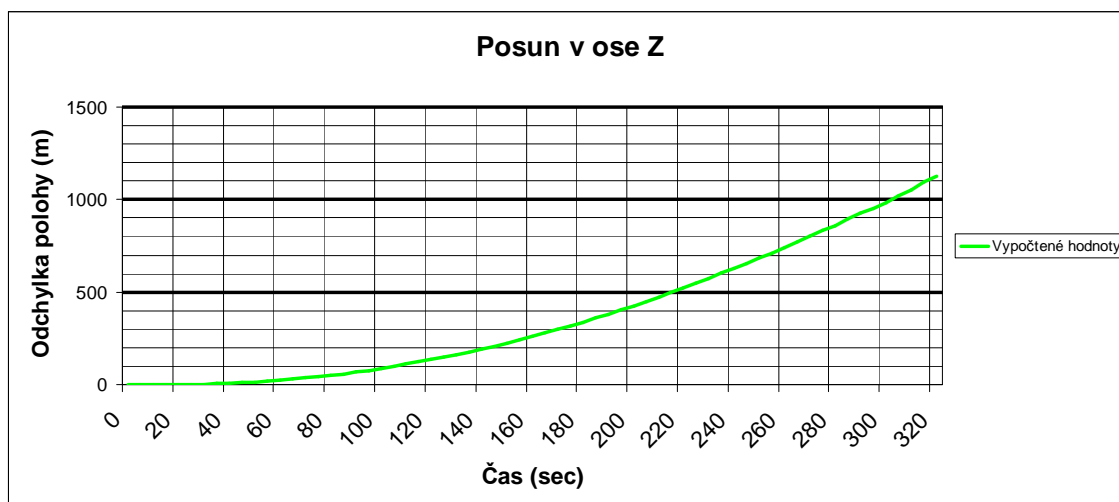


Graf 1 Posun polohy v ose X (měření 1)

Z grafu je patrné, že v horizontu pěti minut se poloha modul bez pohybu změnila takřka o 1500 metrů. V ose Y to bylo v největší odchylce pouze o necelých 300 metrů.



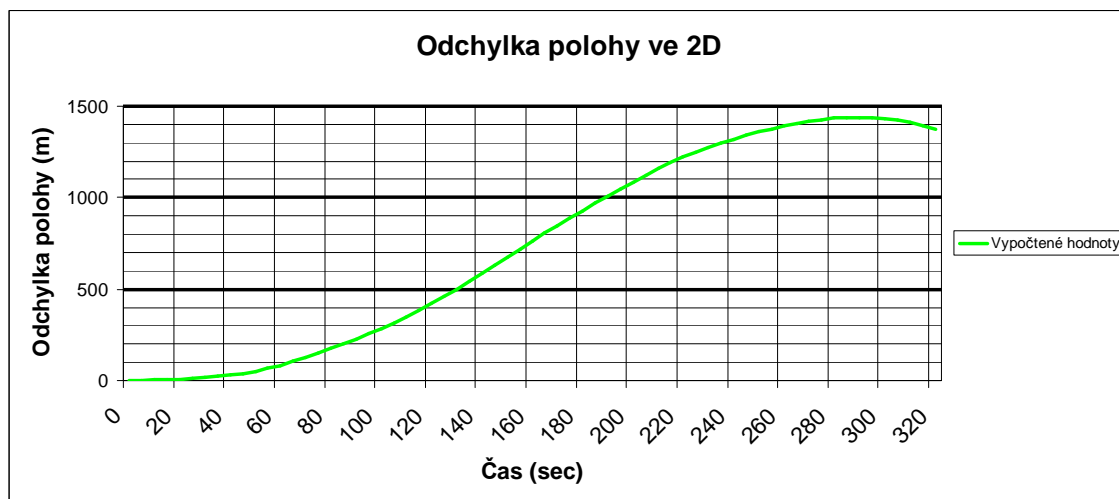
Graf 2 Posun polohy v ose Y (měření 1)



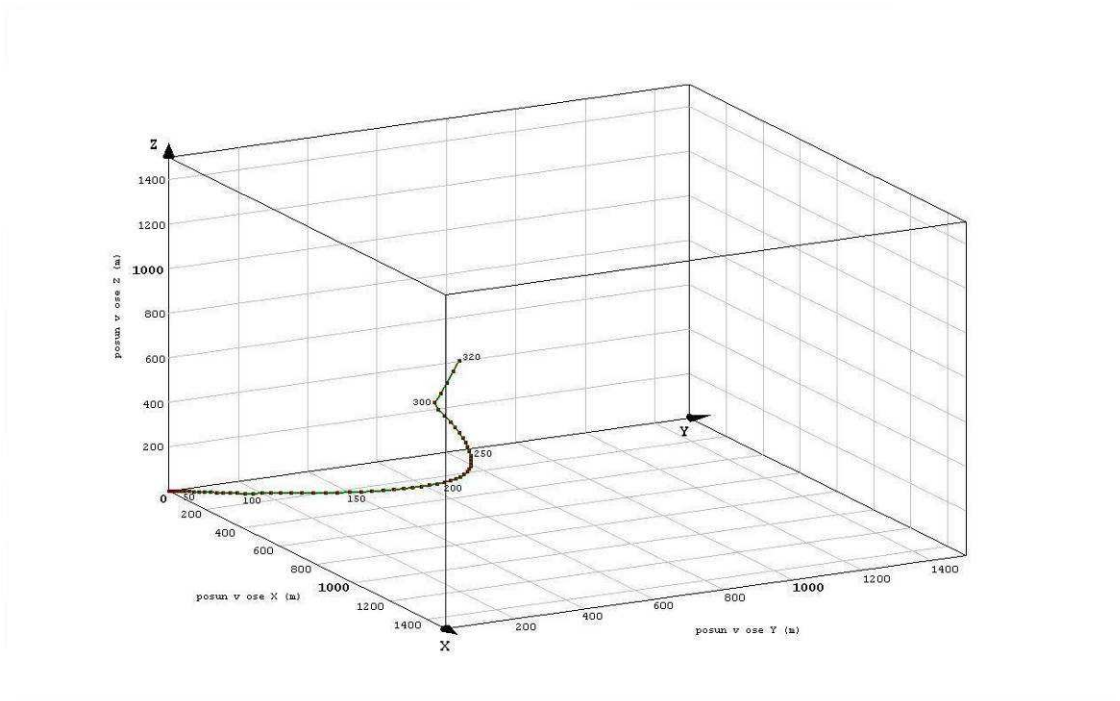
Graf 3 Posun polohy v ose Z (měření 1)

Na grafu číslo 3 lze vidět odchylku hodnot v ose Z, tedy kolmé k povrchu. Maximální hodnota je nad 1100 metrů, ovšem toto je absolutní hodnota, neboť vypočtené hodnoty měly klesavou tendenci tj. od cca 180m do -920m.

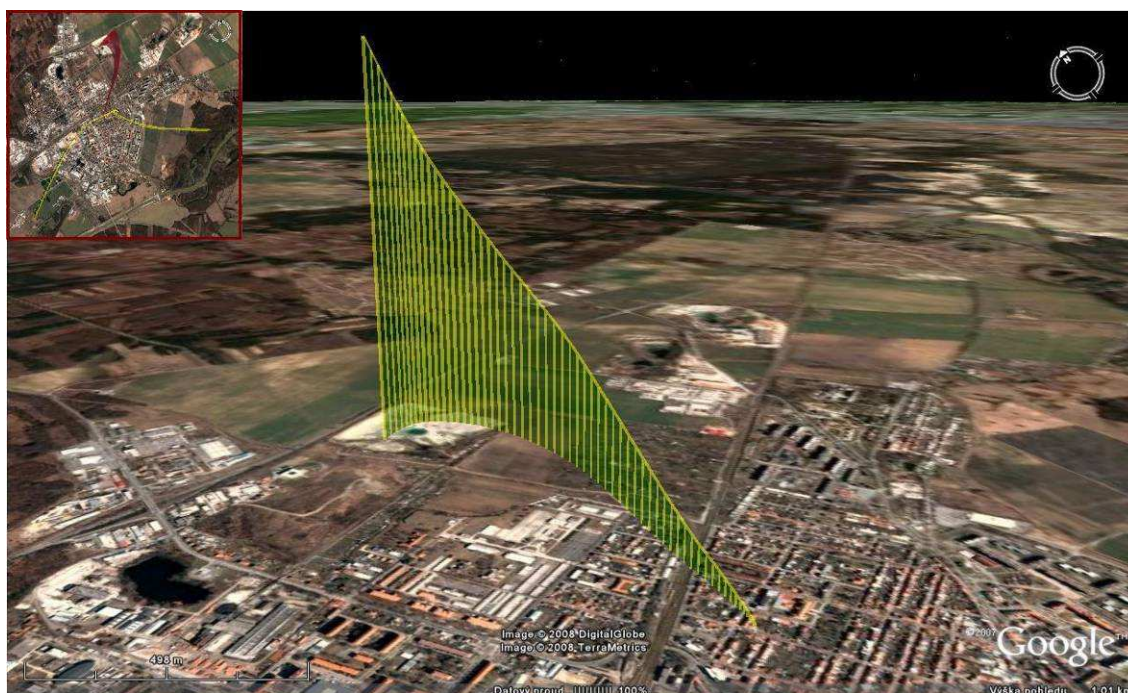
Na závěr ještě grafické vyhodnocení plošného posunu (v ose X a Y), který činil 1375 metrů od výchozího místa.



Graf 4 Odchylka polohy v ploše (měření 1)



Graf 5 Vývoj odchylky v prostoru (měření 1)

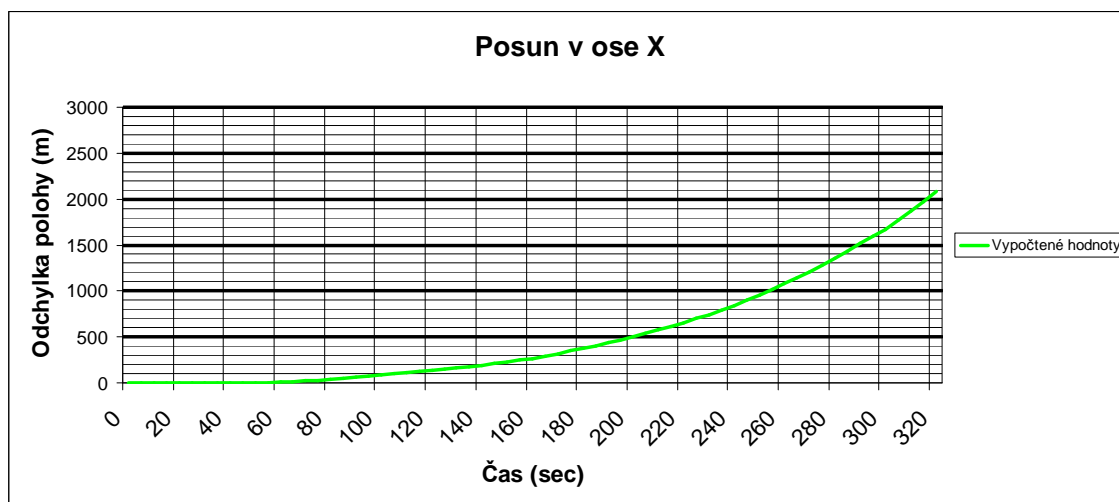


Obr. 22 Vizualizace prvního měření v programu Google Earth

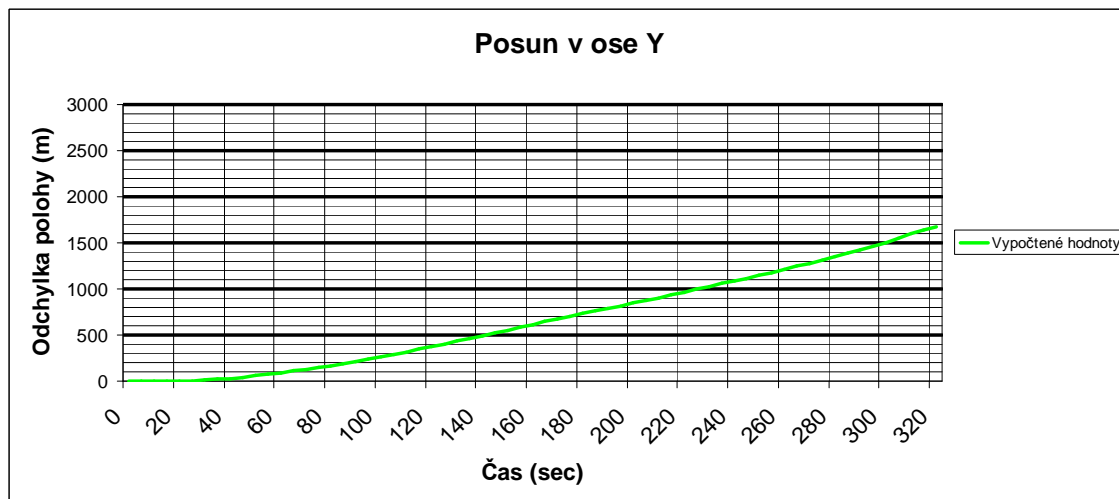
Pro názornost byly s výsledných hodnot vytvořeny KML vrstvy, které byly importovány do programu Google Earth. Město na leteckém snímku je Hodonín.

Aby bylo lépe vidět průběh odchylky, byl obraz natočen, v pravém horním rohu je možné vidět severku v levém pak všechny tři měření, červeně je zvýrazněno právě zobrazené.

4.2.2 Druhé měření

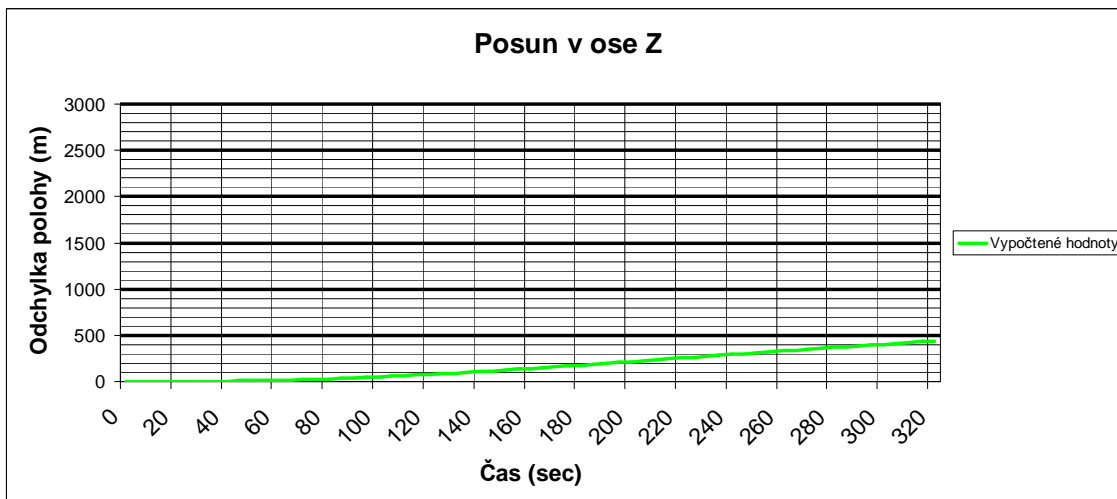


Graf 6 Posun polohy v ose X (měření 2)



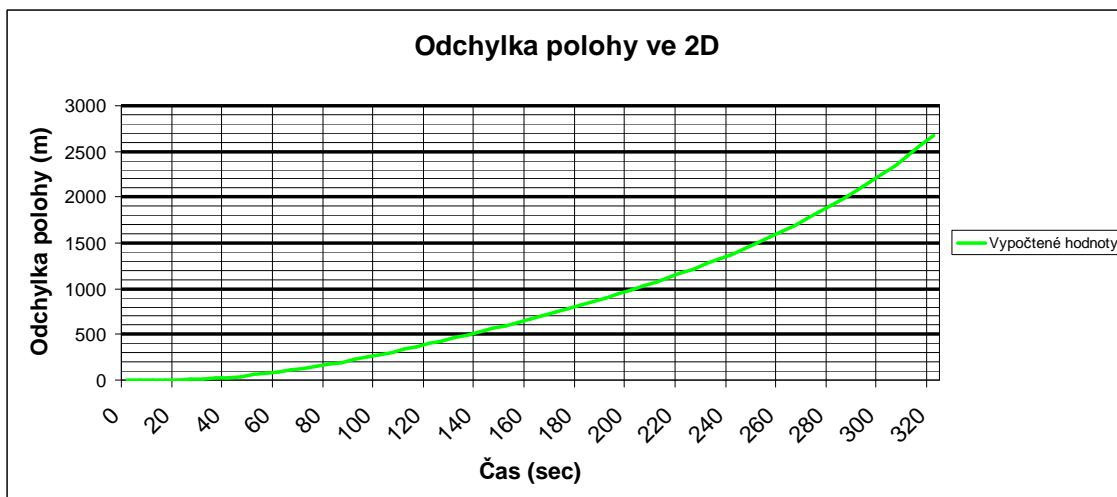
Graf 7 Posun polohy v ose Y (měření 2)

Zde jsou maximální odchylky v ose X a Y podobné a to o velikosti v okolí 2000 metrů. Ovšem jejich průběh je rozdílný, zatímco v ose X má vývoj ze začátku pozvolnější tendenci a strmější a vyšší konec, tak v ose Y je nárůst více méně konstantní.



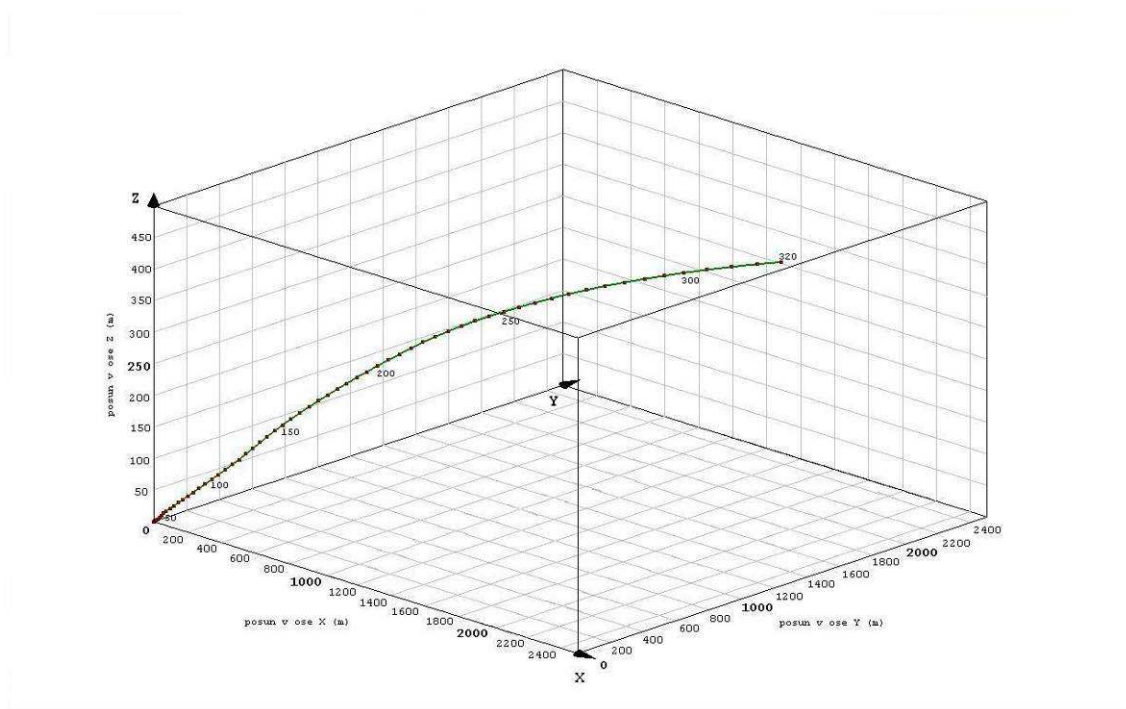
Graf 8 Posun polohy v ose Z (měření 2)

Hodnota posunu v ose Z je nejmenší v tomto měření a také nejmenší ve srovnání s posuny v zetové ose v dalších dvou měřeních. Rovněž upadá do záporných hodnot.



Graf 9 Odchylka polohy v ploše (měření 2)

Celková plošná odchylka má maximální hodnotu na konci měření 2671 metrů a ze všech tří měření se maximum nejvíce liší od největšího maxima z jednotlivých os.

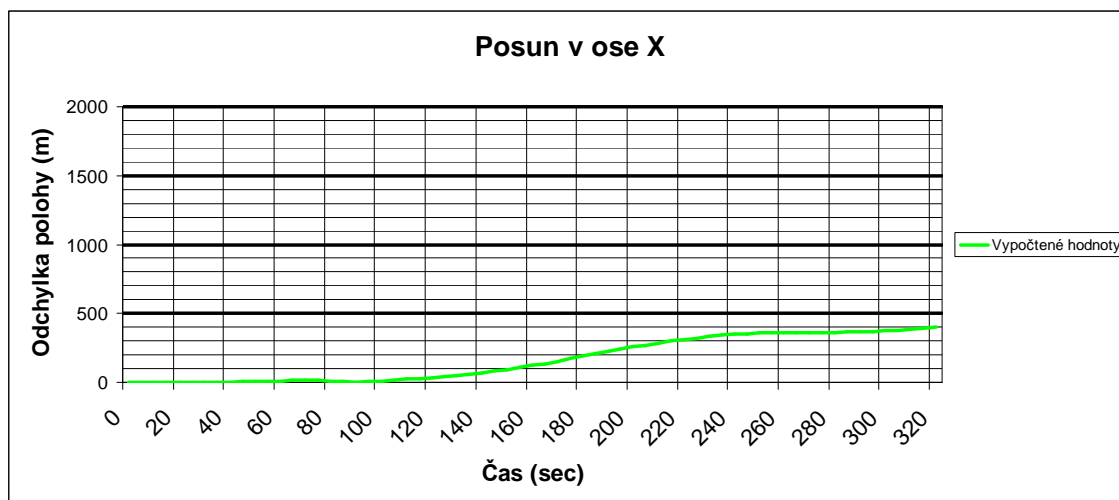


Graf 10 Vývoj odchylky v prostoru (měření 2)



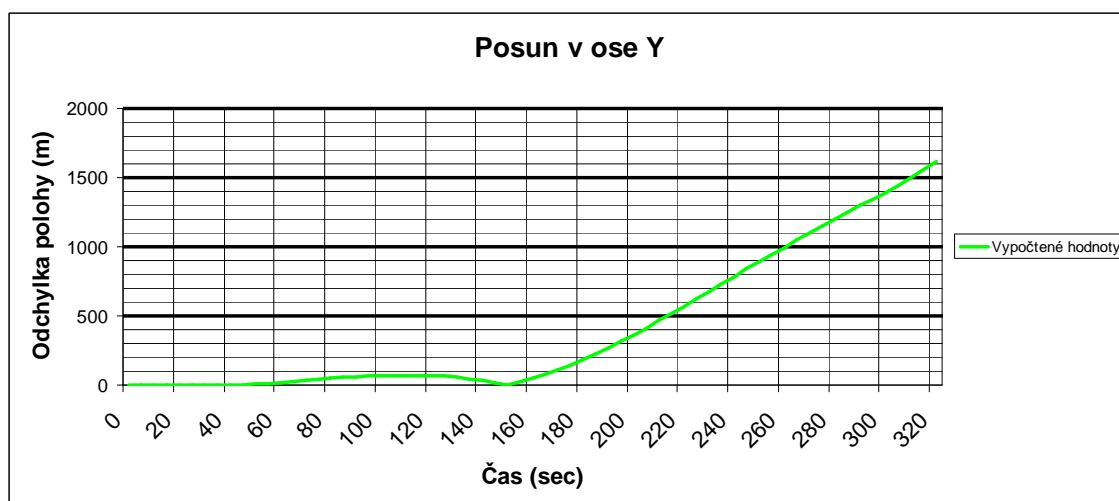
Obr. 23 Vizualizace druhého měření v programu Google Earth

4.2.3 Třetí měření



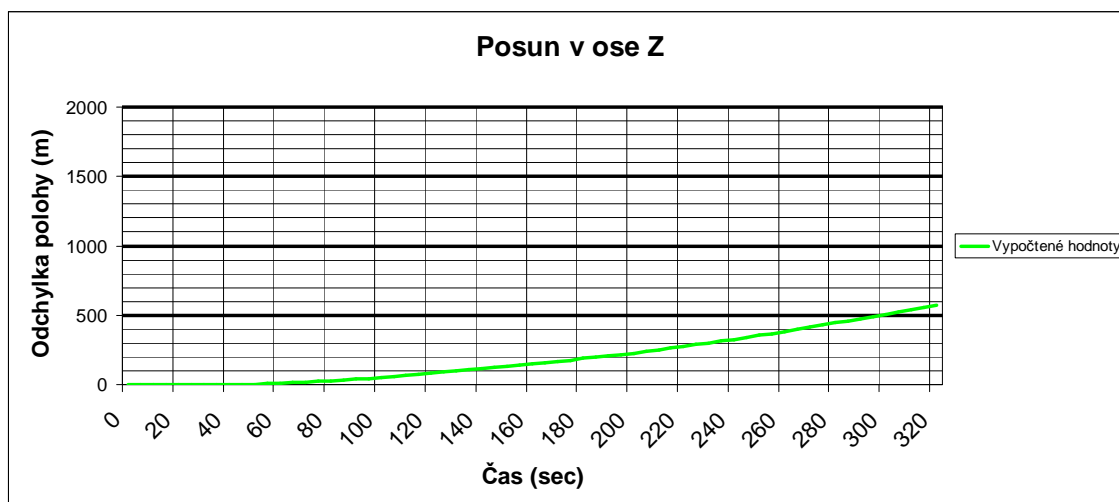
Graf 11 Posun polohy v ose X (měření 3)

Při tomto měření má je odchylka od původní hodnoty nejmenší v ose X a to 398 metrů, ovšem v ose Y je to již přes 1600 metrů.

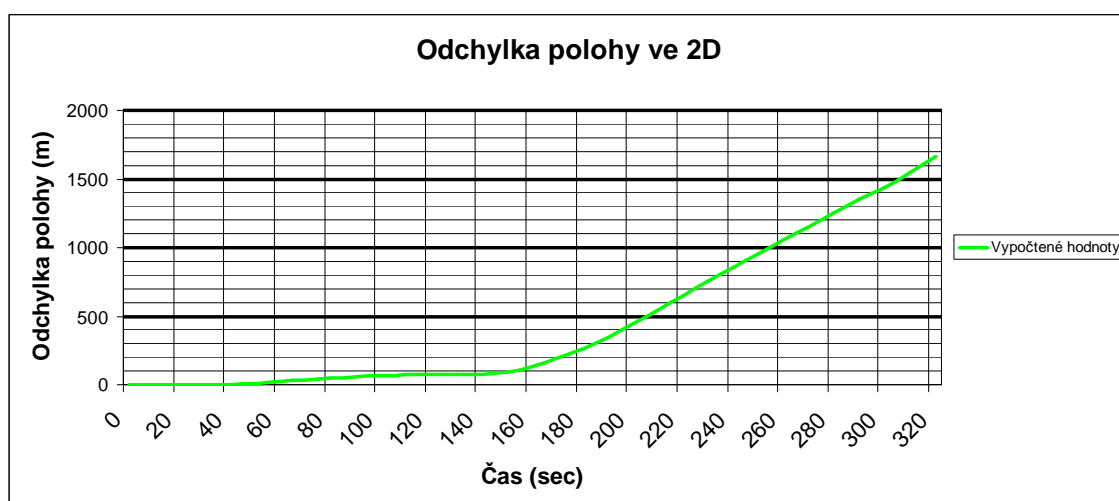


Graf 12 Posun polohy v ose Y (měření 3)

V ose Z byl posun přes 600 metrů a opět v záporném směru.

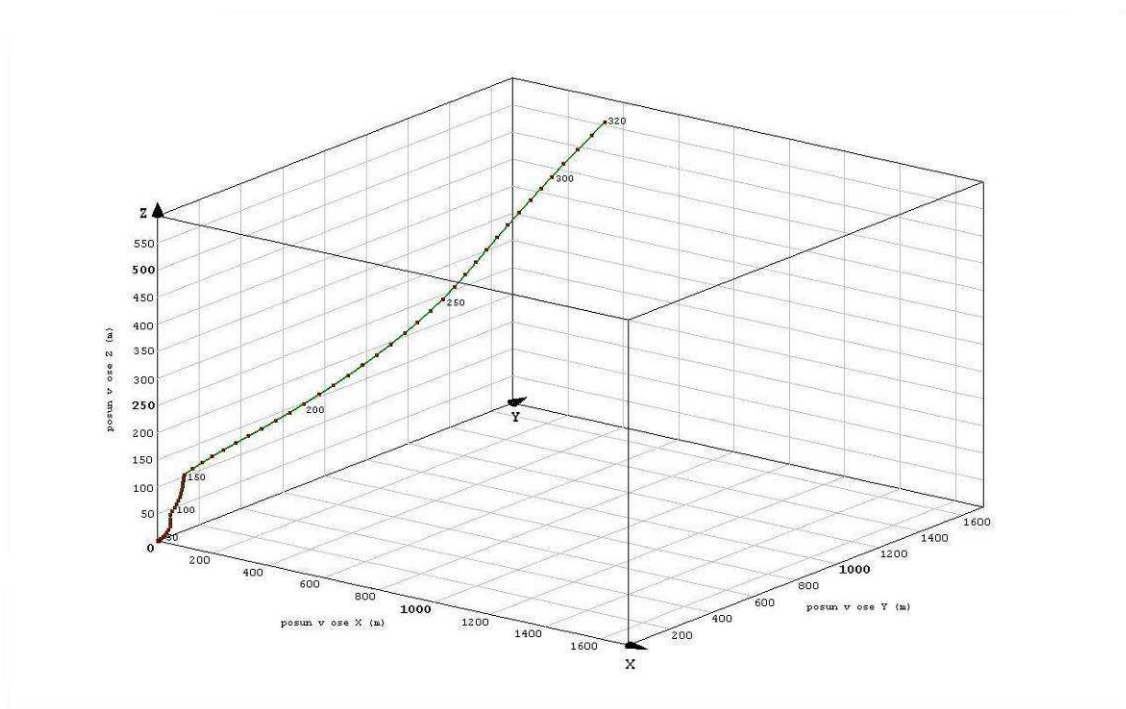


Graf 13 Posun polohy v ose Z (měření 3)



Graf 14 Odchylka polohy v ploše (měření 3)

I přes malý posun v ose X, byla celková plošná odchylka 1661 metrů a to kvůli velkým hodnotám v ose Y.



Graf 15 Vývoj odchylky v prostoru (měření 3)



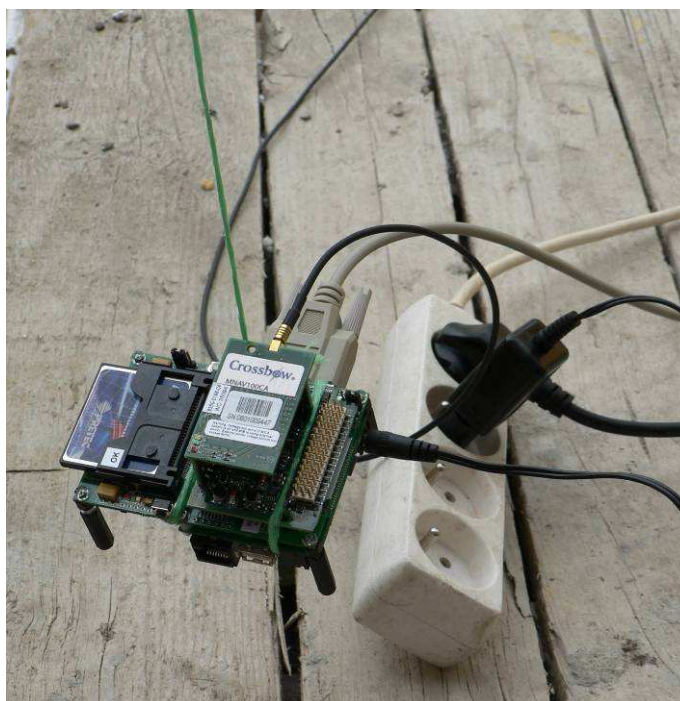
Obr. 24 Vizualizace třetího měření v programu Google Earth

Tento test ukázal, že předem určený limit 30 minut na jedno měření je velice nadsazený, proto bylo nakonec přistoupeno ke zkrácení doby na 5 minut. Jinak předpoklad přírůstků chyby se potvrdil, chyba ve většině přibývala geometrickou řadou, ovšem mnohem více než byl původní odhad.

Jak je vidět z grafů přírůstků hodnot, vždy alespoň jedna z hodnot v daném měření se držela v uspokojivé odchylce, ale hodnoty pro zbylé osy celkovou vzdálenost od původní polohy navýšily.

4.3 Měření druhou metodou (dynamická – stálá)

Měření pohybu po kružnici muselo být vzhledem k technickým problémům zkušeno a byl měřen pouze pohyb po přímce. Problém byl hlavně s tím, že robotické rameno je umístěno v laboratoři, kde není signál pro GPS. Šlo by polohu načíst mimo laboratoř a poté modul přenést, ale už zde by vznikaly chyby, proto byla tato metoda zrušena a byla měřena pouze druhá varianta druhé, tedy dynamické – stálé metody.

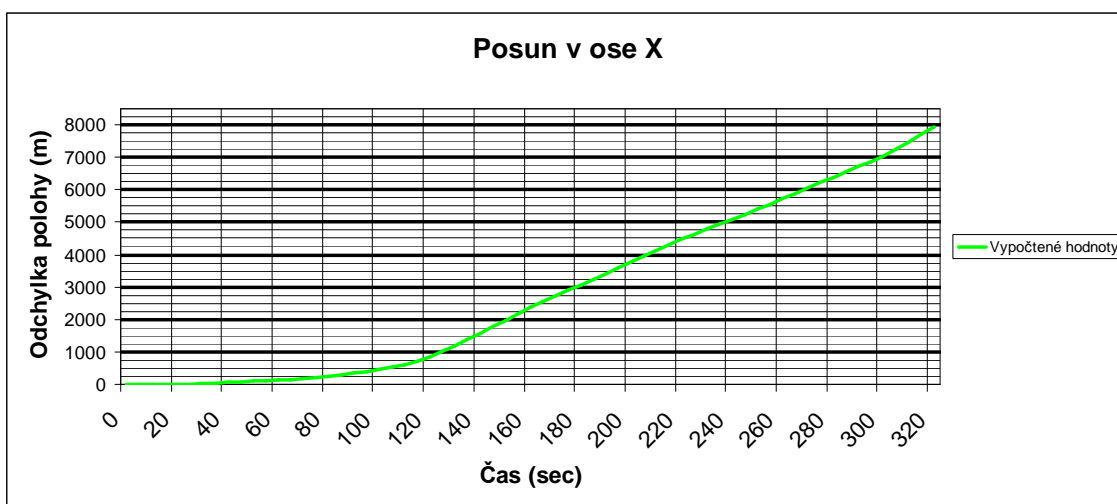


Obr. 25 Modul při měření



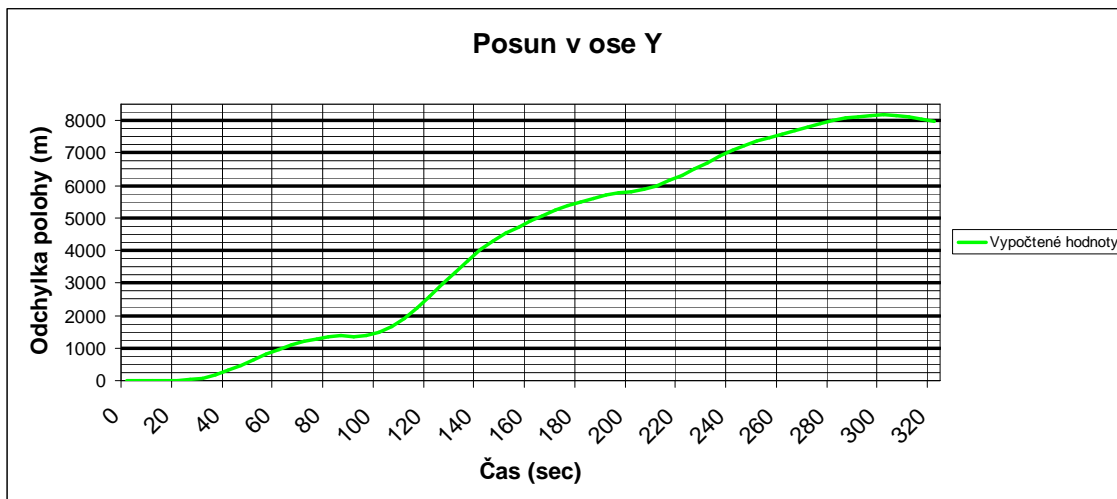
Obr. 26 Měření druhou metodou

4.3.1 První měření



Graf 16 Posun polohy v ose X (měření 1)

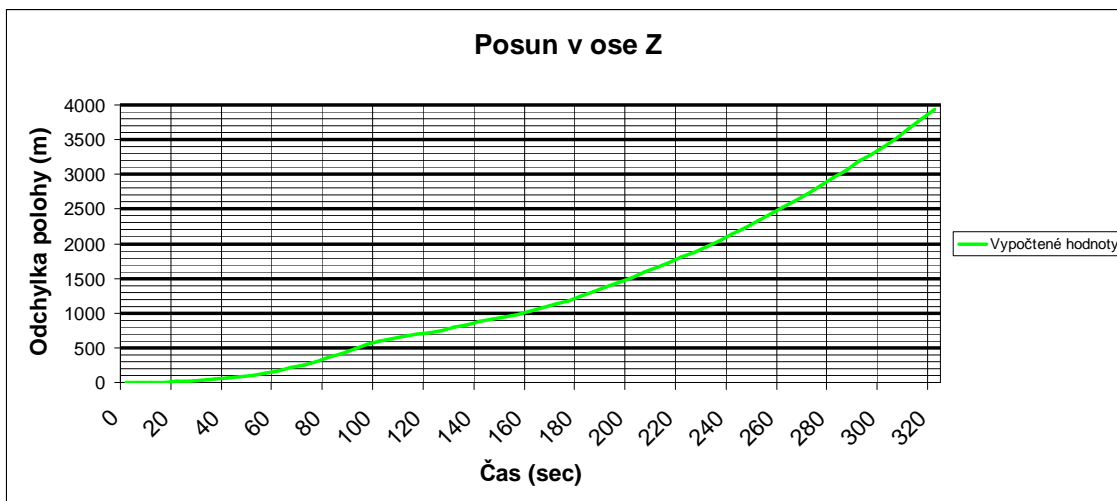
Podle předpokladu odchylka narůstala rovnoměrně ovšem více než ve statickém měření, maximum zde dosáhlo téměř k 8000 metrům.



Graf 17 Posun polohy v ose Y (měření 1)

Velikost konečné chyby je zhruba stejná jako u osy X, ovšem nárůst zde není rovnoměrný, ale narůstá v etapách. Zde je jasně patrné, kdy modul na závěsu rychlost v kyvu zpomalil a kdy byl znovu rozhoupán.

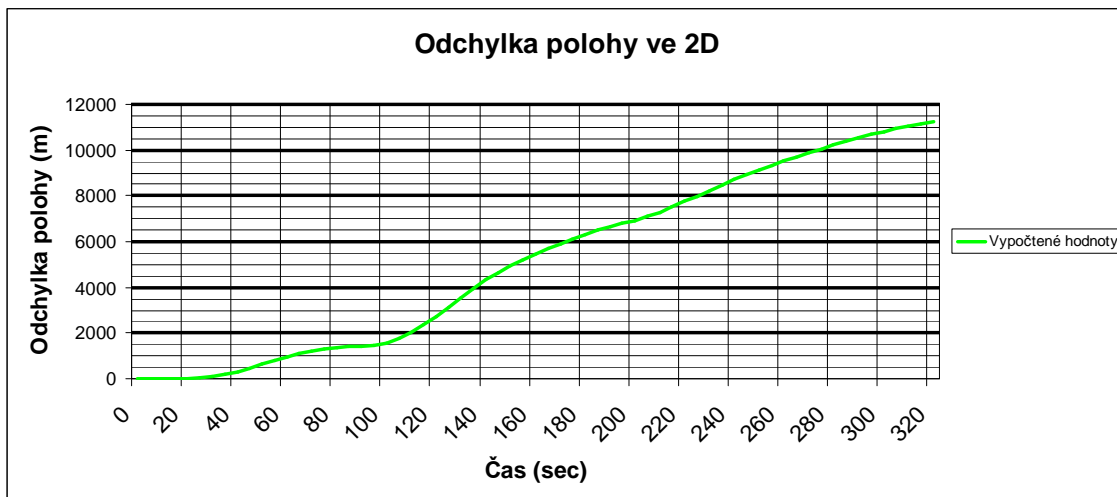
Rozdílný nárůst pro osu X a Y je způsoben tím, že zařízení se pohybovalo pouze ve směru jedné z těchto os.



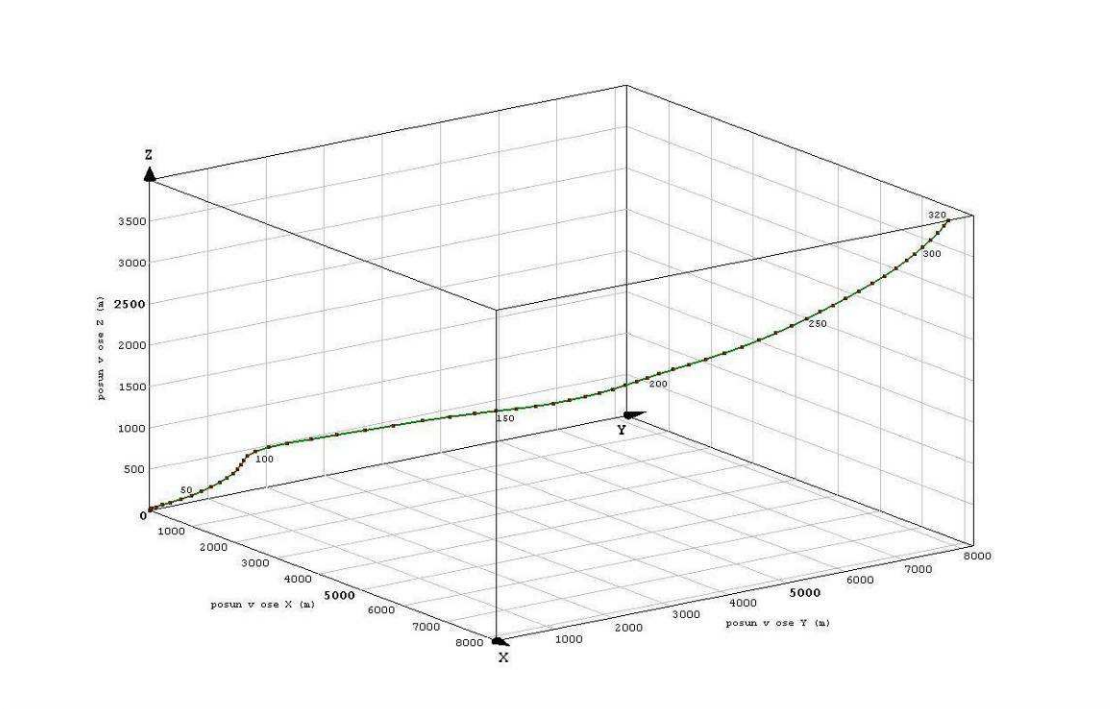
Graf 18 Posun polohy v ose Z (měření 1)

Výchylka v ose Z je oproti zbylým dvěma osám poloviční, téměř 4000 metrů.

I přesto, že se odchylky osy X i Y pohybují pod 8000 metrů, je celková plošná odchylka 11251 metrů.



Graf 19 Odchylka polohy v ploše (měření 1)



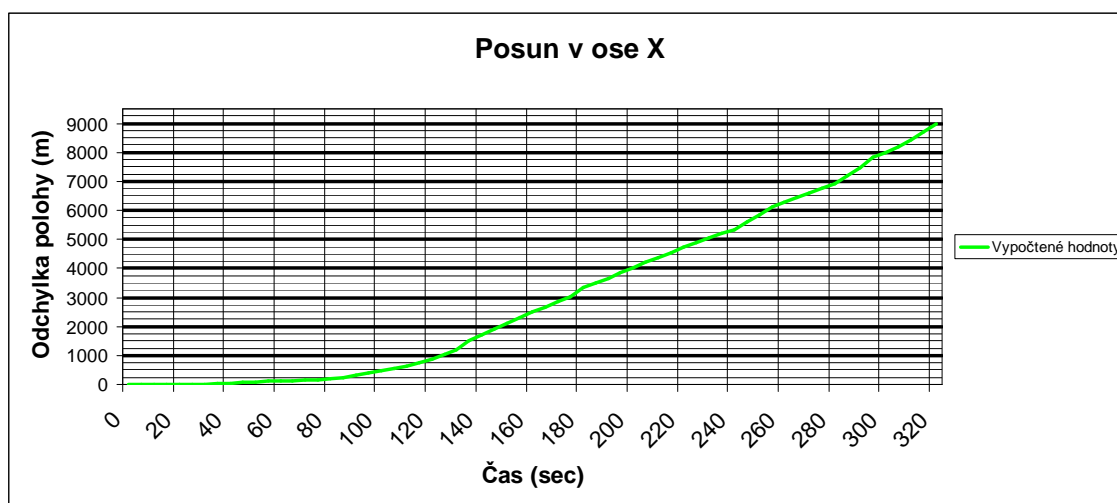
Graf 20 Vývoj odchylky v prostoru (měření 1)

Vzhledem k velikosti odchylek bude vizualizace v programu Google Earth provedena pouze u měření s nejmenší výchylnou, a to je u této metody toto.



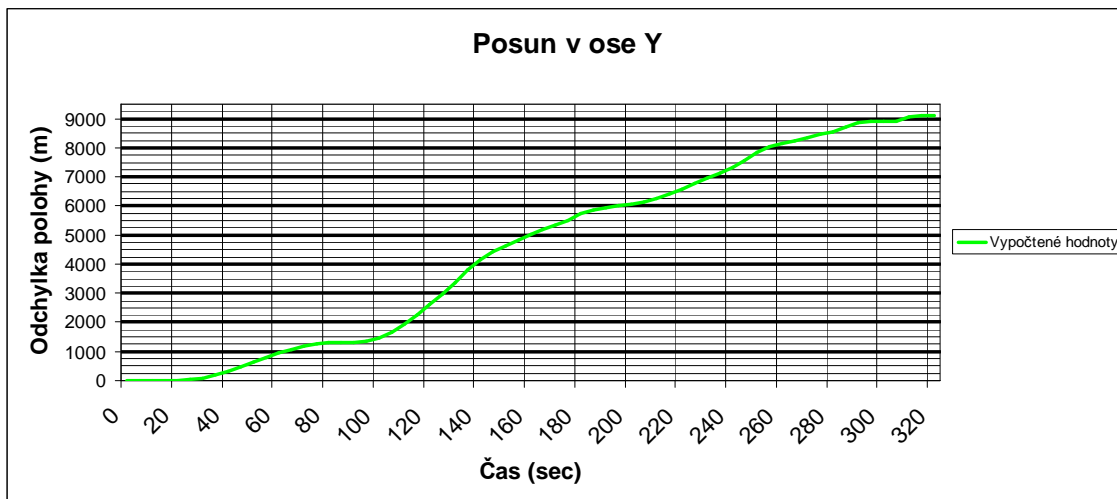
Obr. 27 Vizualizace prvního měření v programu Google Earth

4.3.2 Druhé měření



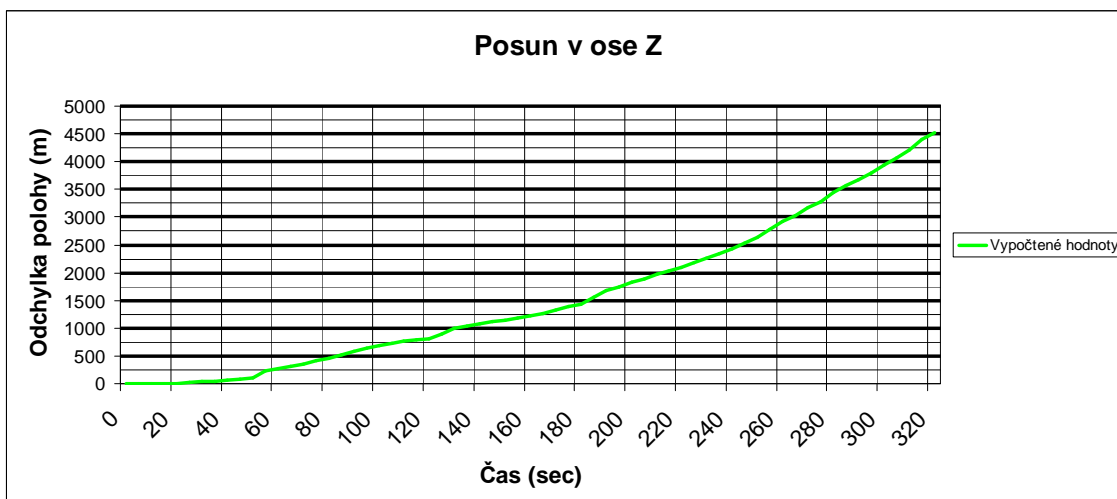
Graf 21 Posun polohy v ose X (měření 2)

Jako u předchozího měření je patrný „schodovitý“ růst chyby v ose Y a takřka rovnoměrný nárůst zhruba od 60 sekundy v ose X. Ovšem velikost konečný odchylek je více než tisíc metrů větší než u prvního měření.



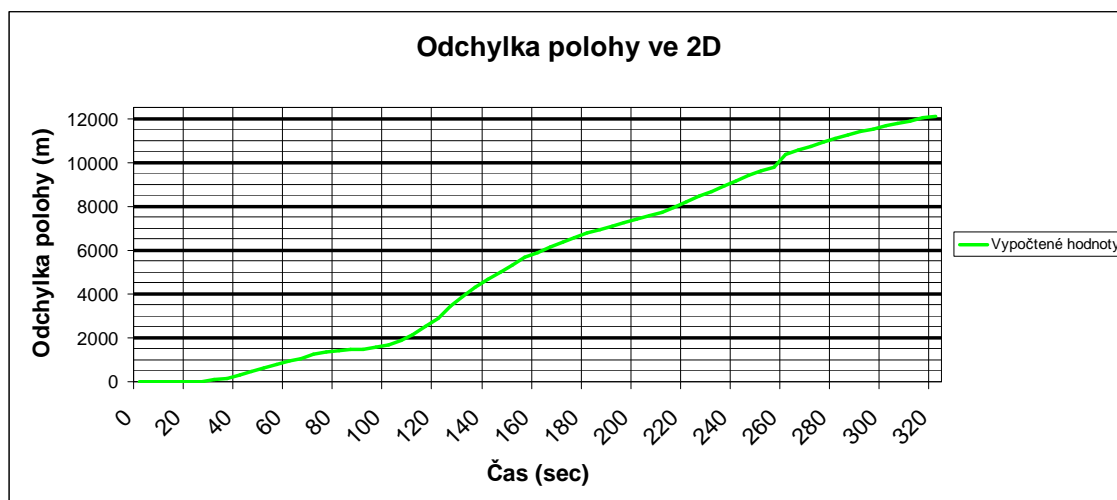
Graf 22 Posun polohy v ose Y (měření 2)

V ose Z má finální výchylka hodnotu 4529 metrů a její nárůst je více méně konstantní.

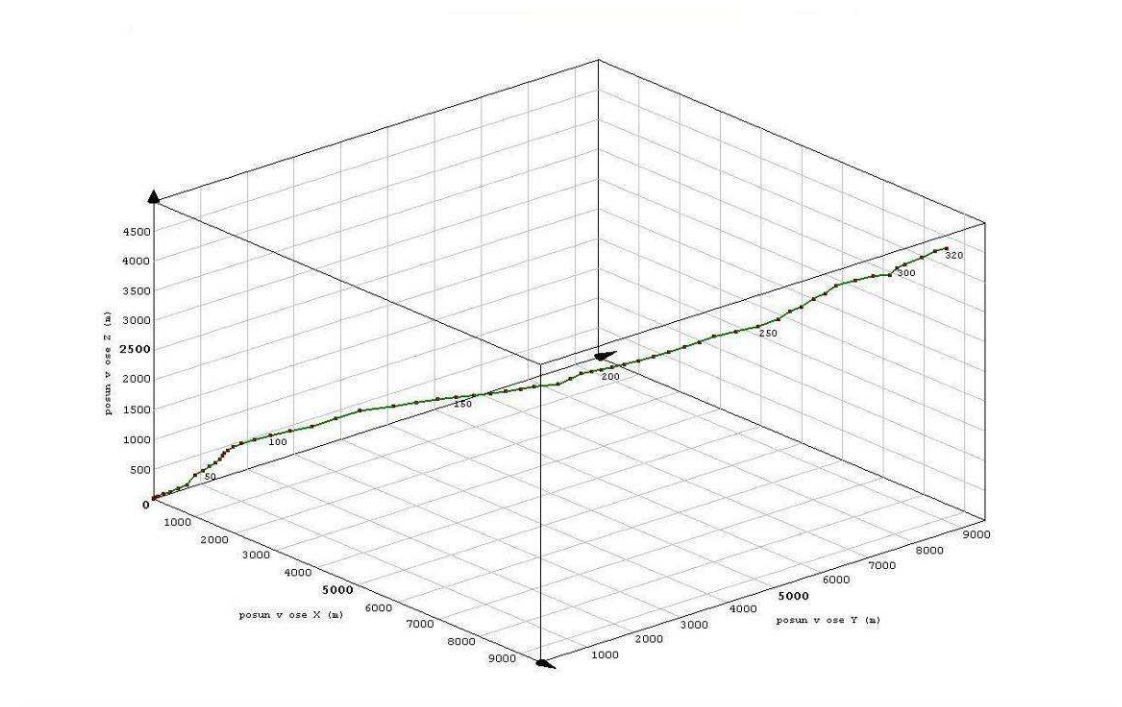


Graf 23 Posun polohy v ose Z (měření 2)

Plošná odchylka vzniklá za 320 vteřin již překročila 12 km, na jejím průběhu jsou patrné vlivy kývavého pohybu.

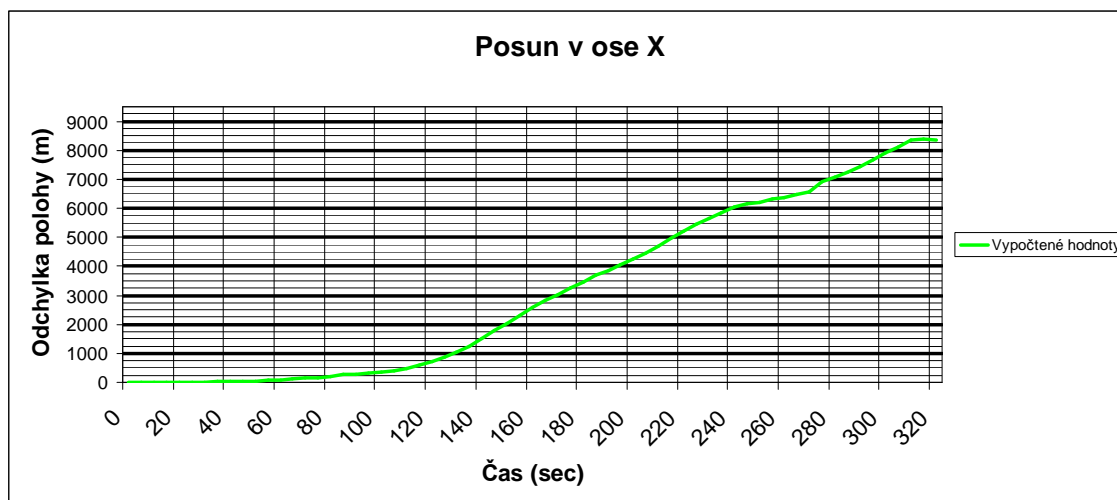


Graf 24 Odchylka polohy v ploše (měření 2)



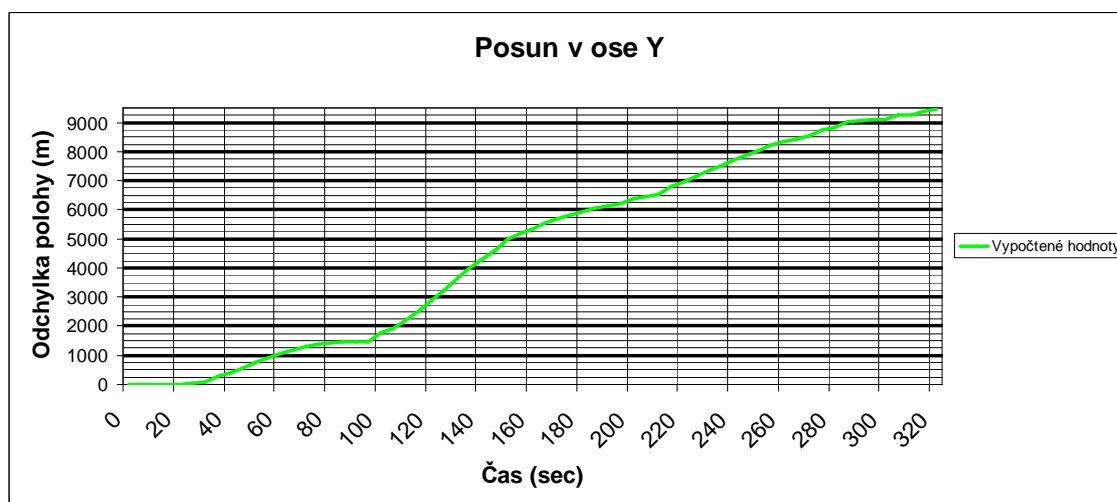
Graf 25 Vývoj odchylky v prostoru (měření 2)

4.3.3 Třetí měření



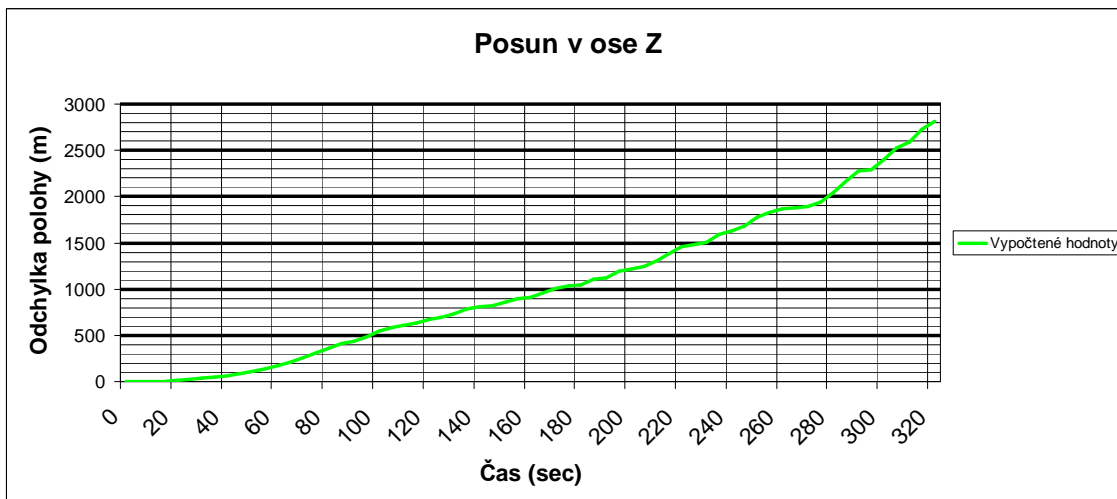
Graf 25 Posun polohy v ose X (měření 3)

Na linii v ose X lze vidět okolo 250 sekundy změnu v jejím průběhu, ta může být způsobena tím, že měření probíhalo ve venkovních prostorech, kde na modul působily i vnější vlivy jako vítr, který ho vychýlil z jeho dráhy, a tím mohlo být částečně ovlivněno měření.

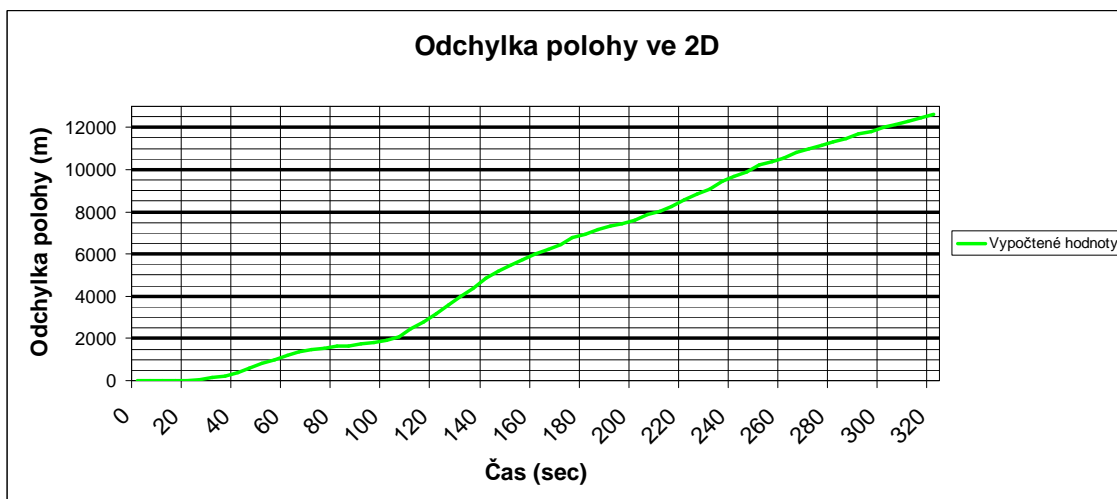


Graf 26 Posun polohy v ose Y (měření 3)

Na ose Y tak jako u předešlých měření lze snadno identifikovat průběh (změnu rychlosti) kyvu. Na ose Z jsou patrné opět výchylky oproti konstantnímu nárůstu, ty jsou zde zřejmě ze stejného důvodu, který byl zmíněn u osy X. Velikost výchylky v této ose má hodnotu 2817 metrů.

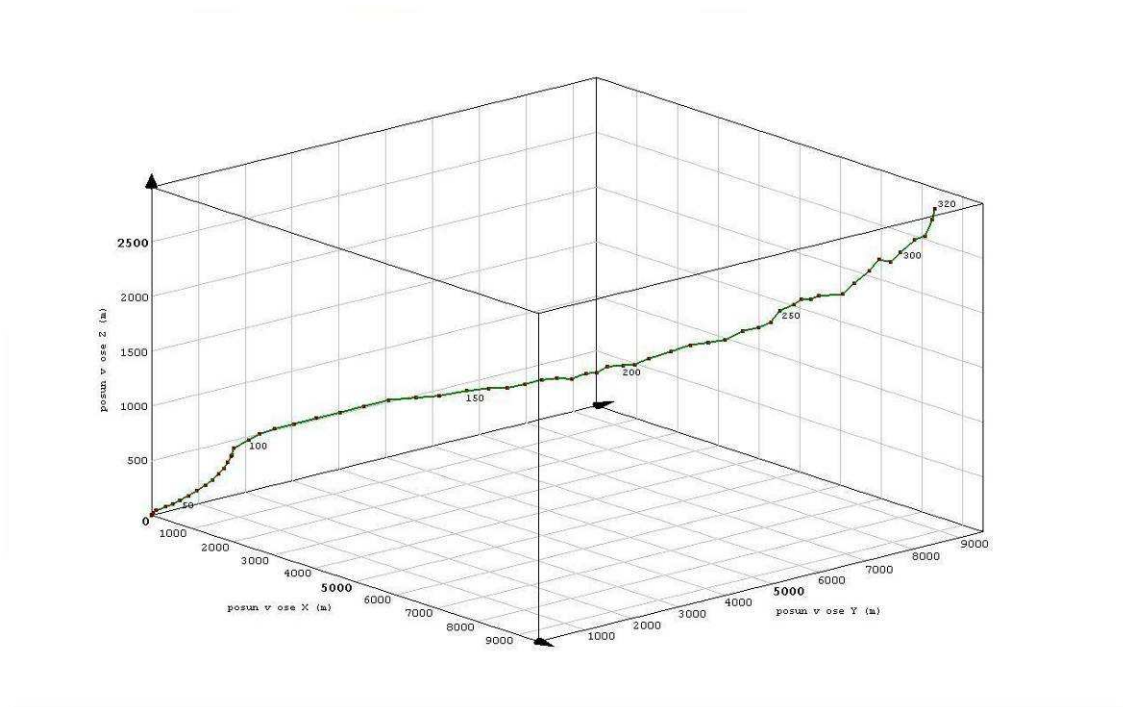


Graf 27 Posun polohy v ose Z (měření 3)



Graf 28 Posun polohy v ploše (měření 3)

Celková plošná odchylka je 12600 metrů a její průběh je opět ovlivněn průběhem růstu odchylky v ose Y.



Graf 29 Vývoj odchylky v prostoru (měření 3)

4.4 Měření třetí metodou (dynamická – variabilní)

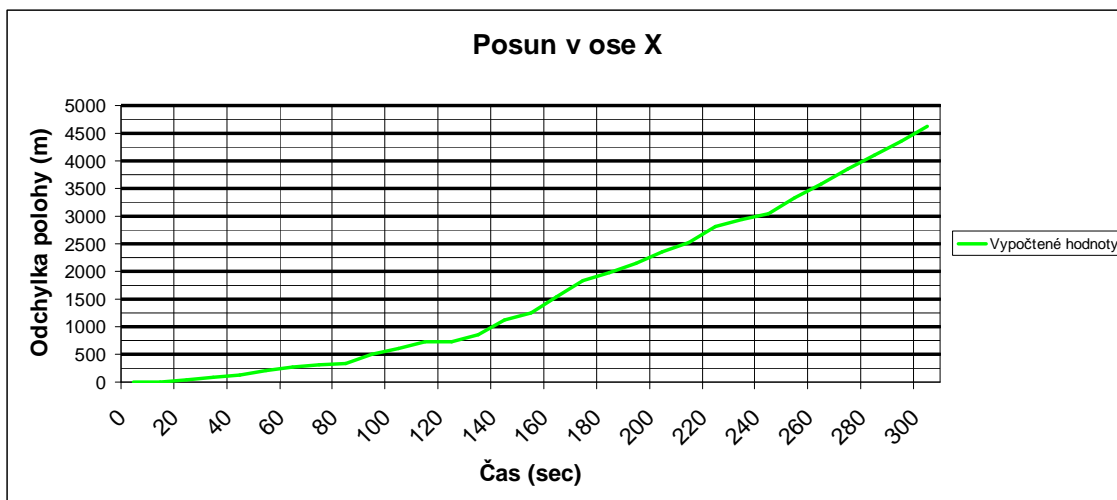
Každé měření v této metodě bylo jedinečné, jednalo se o zcela náhodný pohyb v různých směrech, proto i výsledné hodnoty odchylek jsou rozdílné velikosti, jak už v osách samých, tak i v porovnání jednotlivých měření.

Při každém měření bylo v 5 minutách provedeno takřka 30 průchodů výchozím bodem a byl u nich zaznamenán čas, poté byly vybrány hodnoty odpovídající těmto časům. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o třicet hodnot, mohou se zdát grafy méně hladké.

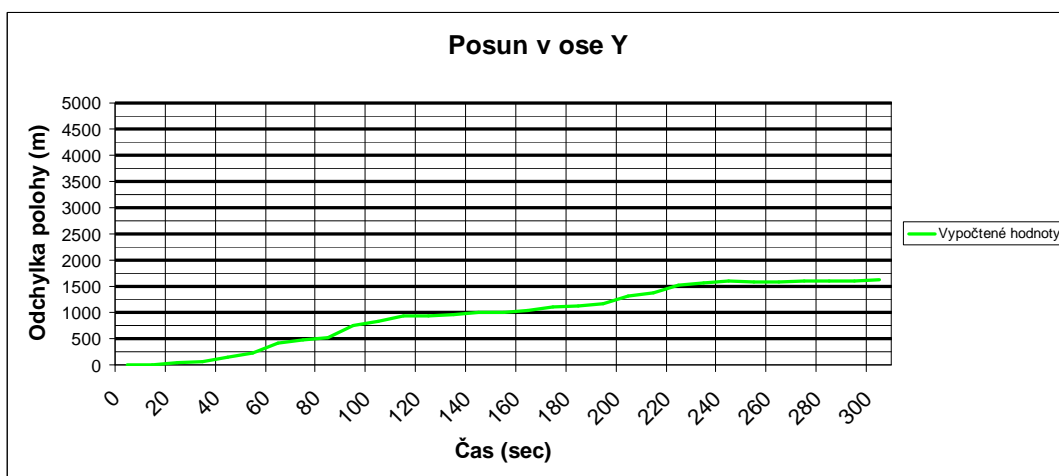
4.4.1 První měření

Při tomto testu byl modul dle výsledných odchylek nejvíce zatížen pohybem v ose X, zde má výsledná odchylka hodnotu vyšší než 4500 metrů a v ose Z, zde je

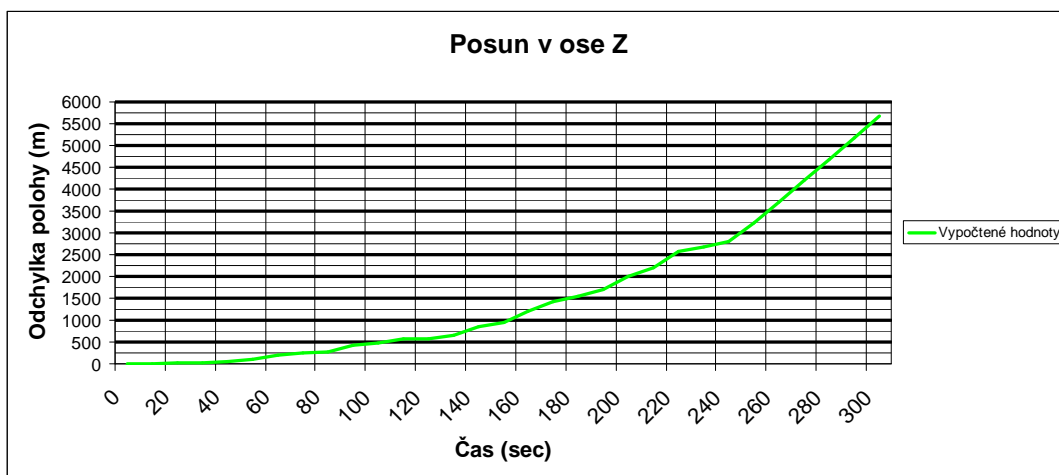
maximum vyšší než 5500 metrů. Oproti tomu v ose Y je odchylka pouze jen o něco málo vyšší než 1,5 kilometru.



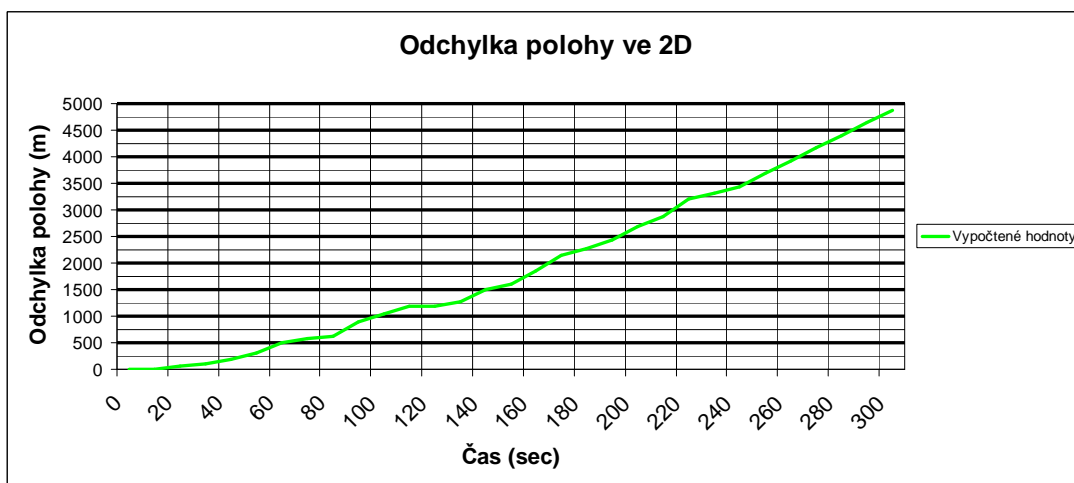
Graf 30 Posun polohy v ose X (měření 1)



Graf 31 Posun polohy v ose Y (měření 1)

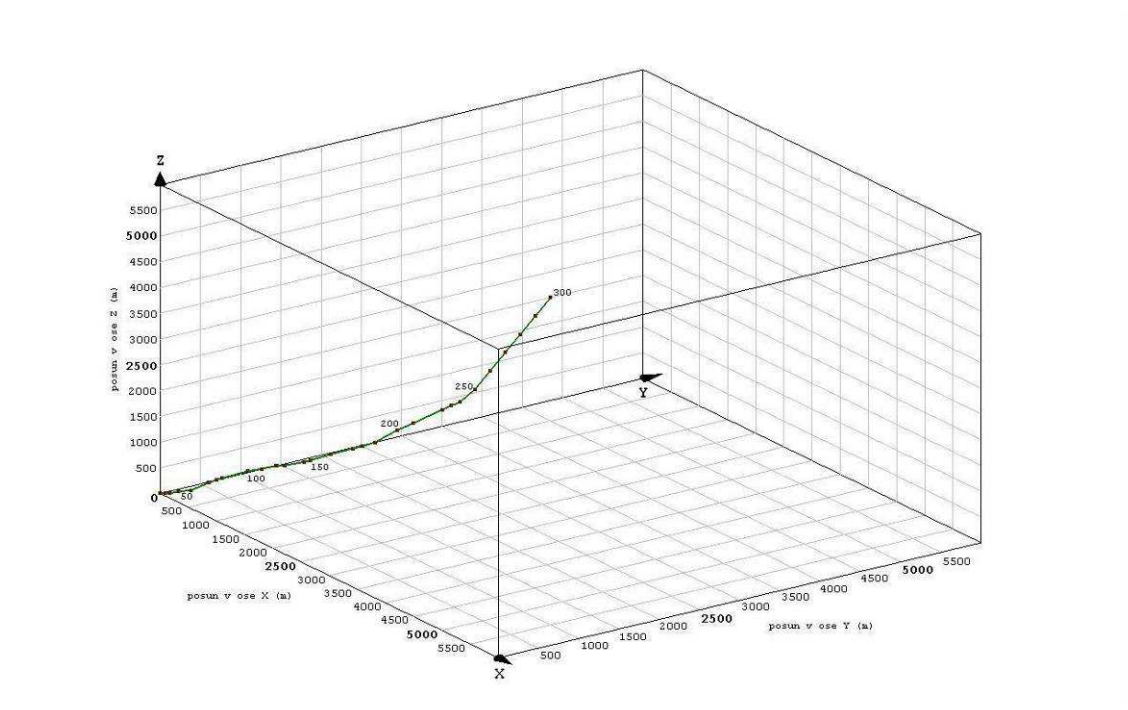


Graf 32 Posun polohy v ose Z (měření 1)



Graf 33 Posun polohy v ploše (měření 1)

Plošná odchylka u tohoto měření se blíží k 5000 metrům, na jejím nárůstu není patrný žádný trend, jen její velikost je ovlivněna nízkou hodnotou v ose Y.

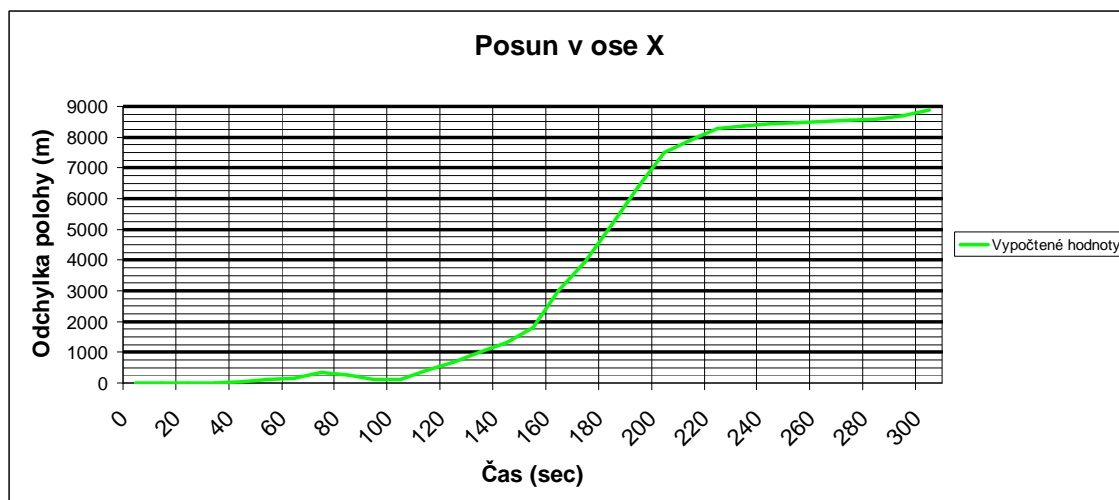


Graf 34 Vývoj odchylky v prostoru (měření 1)



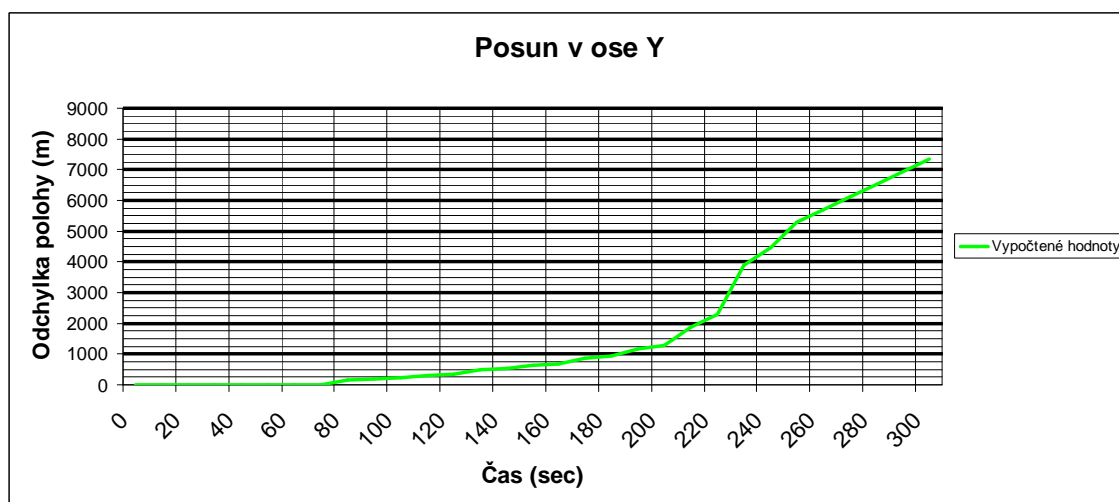
Obr. 28 Vizualizace prvního měření v programu Google Earth

4.4.2 Druhé měření

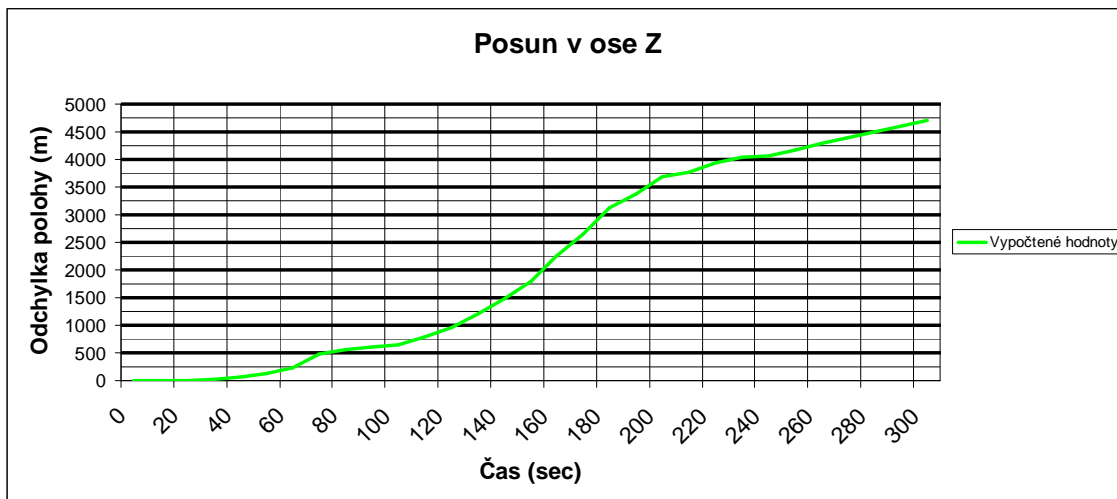


Graf 35 Posun polohy v ose X (měření 2)

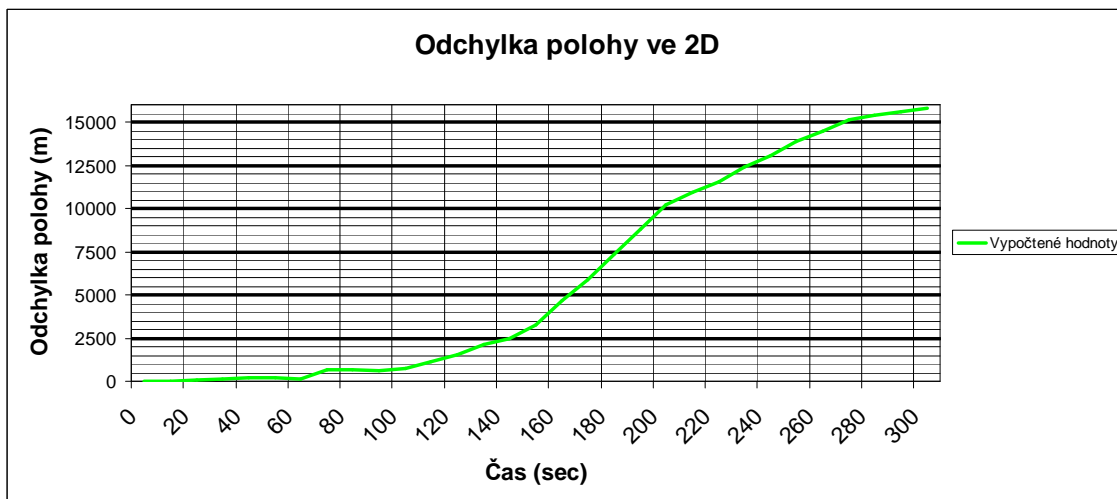
U tomto testu, jak je z výsledků patrné, byl modul zřetelně více zatížen mezi druhou až čtvrtou minutou a to především v osách X a Z. Na grafu tomu odpovídá strmější nárůst linie velikosti chyby. Ta v ose X je ve svém maximu těsně pod 9000 metry.



Graf 36 Posun polohy v ose Y (měření 2)

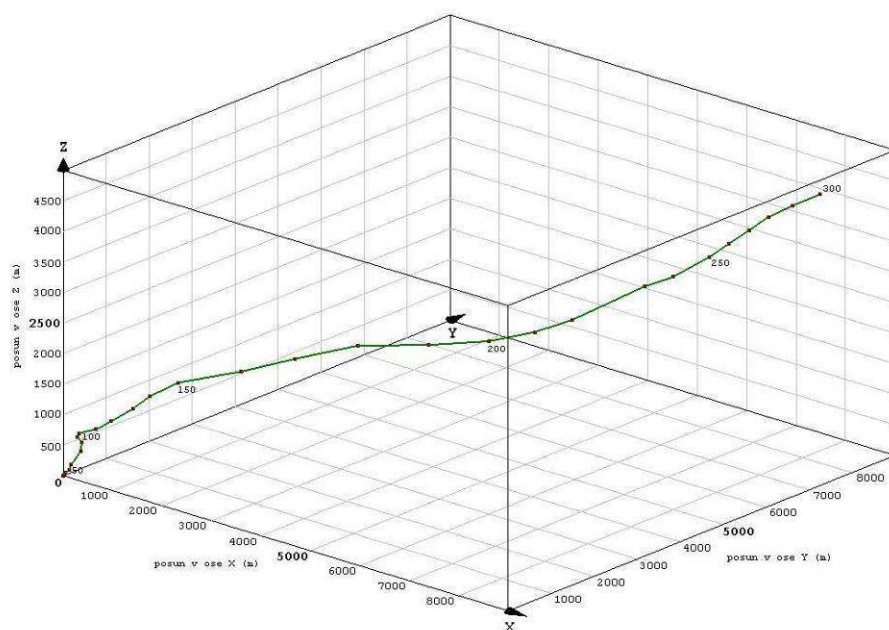


Graf 37 Posun polohy v ose Z (měření 2)



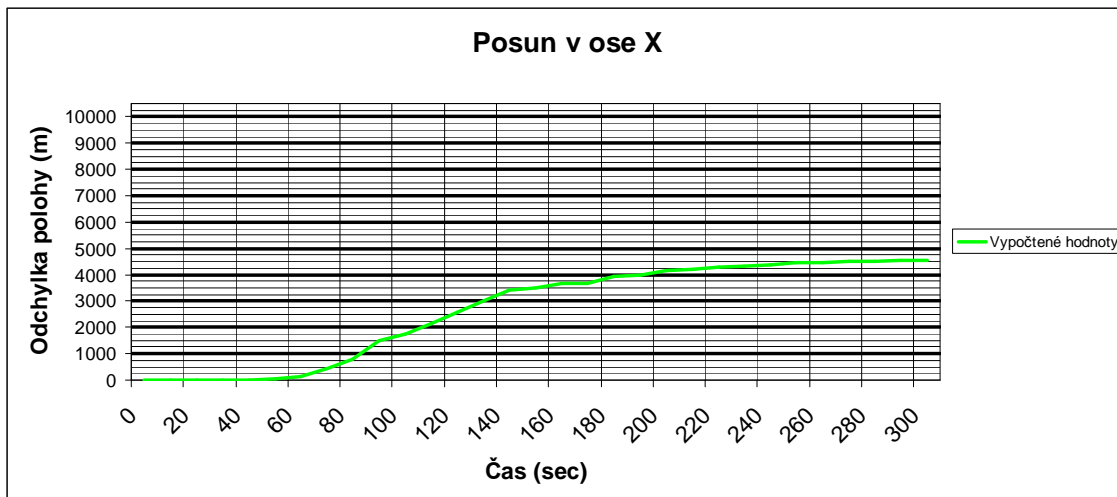
Graf 38 Posun polohy v ploše (měření 2)

Celková plošná odchylka kopíruje zátěž modulu a je zde patrný zvýšený pohyb modulu mezi 2 a 4 minutou, ve svém maximu má plošná odchylka 15818 metrů.



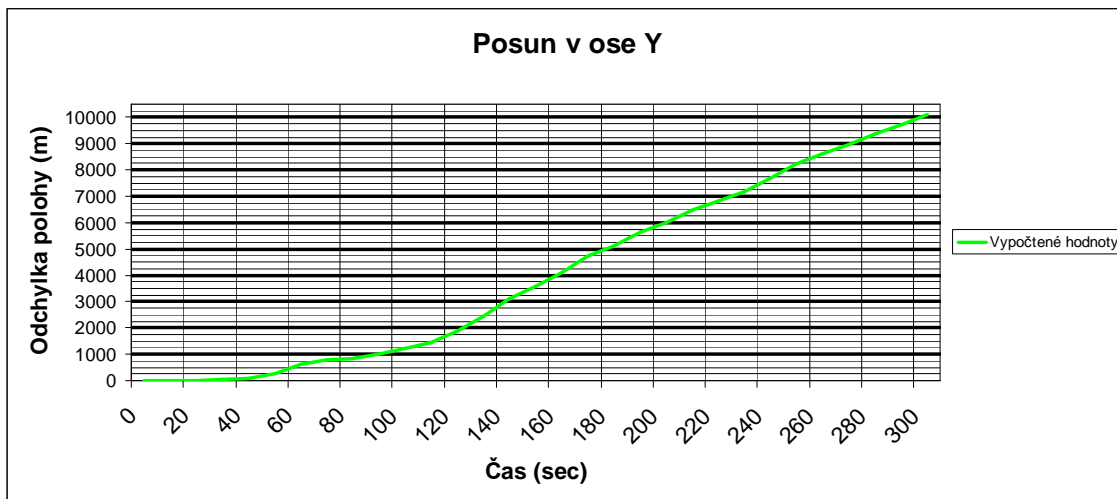
Graf 39 Vývoj odchylky v prostoru (měření 2)

4.4.3 Třetí měření

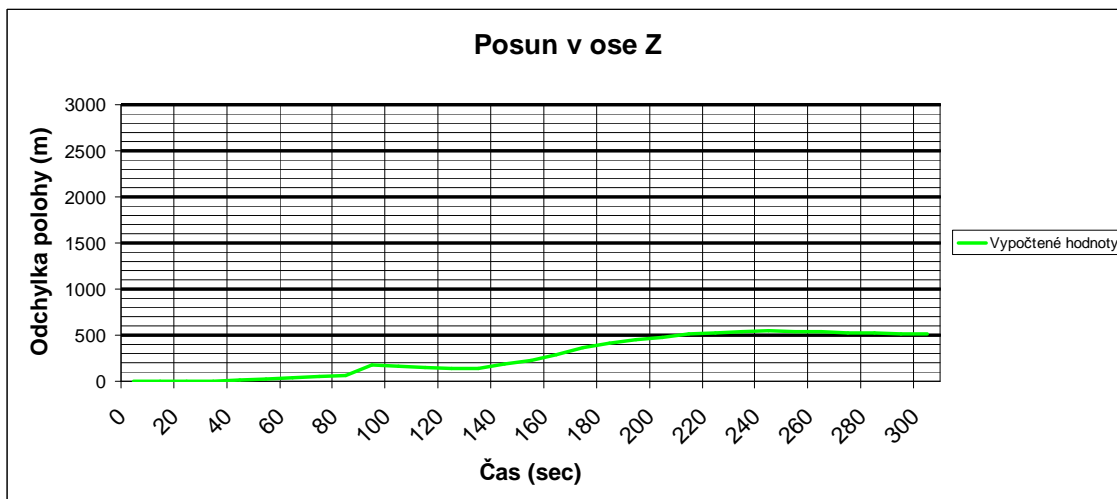


Graf 40 Posun polohy v ose X (měření 3)

Při třetím měření byl nejvíce zatížen modul v ose Y a to celkem rovnoměrně, ovšem hodnota nejvyšší odchylky se vyšplhala až nad 10000 metrů, oproti tomu maximum v ose X je o více než polovinu nižší.

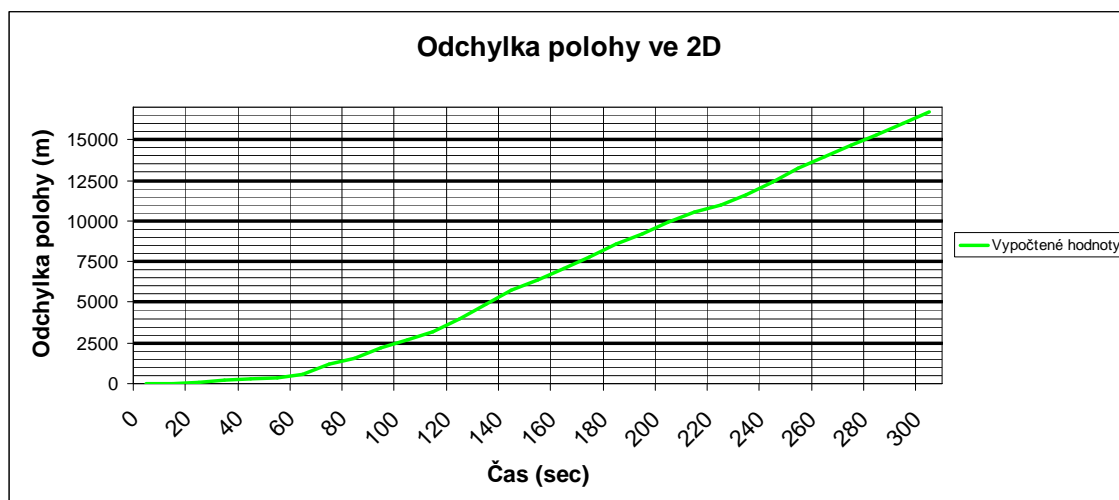


Graf 41 Posun polohy v ose Y (měření 3)

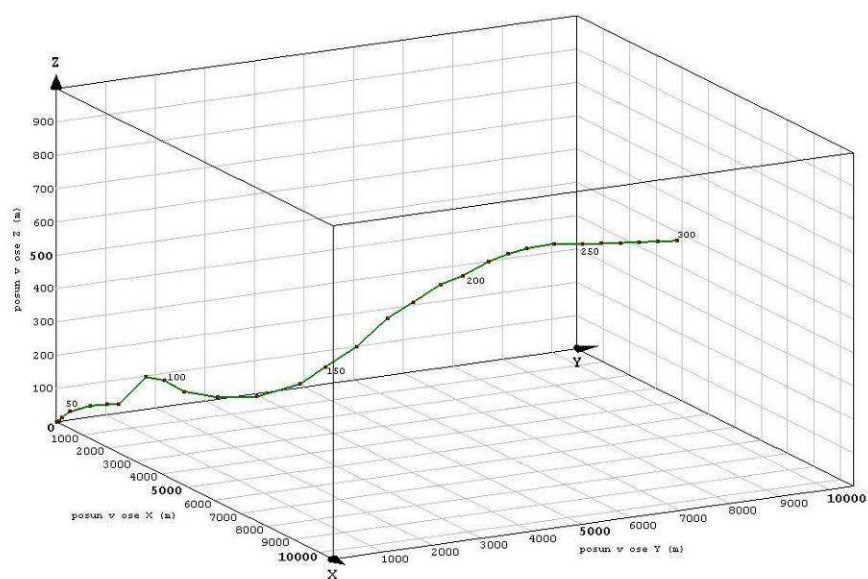


Graf 42 Posun polohy v ose Z (měření 3)

V ose Z se chyba v porovnání s ostatními měřeními takřka nevyskytla. Ve svém maximu má pouze 545 metrů.



Graf 43 Posun polohy v ploše (měření 3)



Graf 44 Vývoj odchylky v prostoru (měření 3)

5 Kooperace s robotem

Tento stroj je vytvářen v rámci projektu na Vysoké škole báňské, jedná se o mobilní robotické zařízení zaměřené na snímání a sběr prostorových dat v pro člověka nebezpečných či nedostupných prostorech. Na jeho vývoji se podílí tým složený z osob z různých fakult a kateder této školy.

Robot je osazen fotogrametrickou základnou s kamerami a embedded počítačem zajišťujícím zpracování dat. Mohl by být také vybaven právě testovaným modulem.



Obr. 29 Vizualizace robota

Modul je zde možné použít pro mapování pohybu pomocí GPS a při horším signálu zpřesněním polohy dopočtem z kalmanova filtru, nebo vizualizaci náklonu zařízení z dat dodávaných inerciálními senzory (to může varovat a tím i zabránit převrácení robota), či ovládání serv například pro stabilizaci kamer.



Obr. 30 Robot při testech

Ovšem jak je zřejmé z výsledků testování modulu samostatná navigace bez dat z GPS antény je možná pouze zhruba prvních 10 sekund po výpadku signálu. Proto v tomto ohledu může sloužit modul jen jako záloha pro náhodný krátkodobý výpadek signálu, při delším výpadku je již navigace pouze za pomoci inerciálních senzorů tak nepřesná, že ji již není možné přikládat relevantní váhu.

6 Závěr

V rámci práce byla vypracována metodika pro testování inerciálního navigačního zařízení. Dle této metodiky bylo poté zpracováno měření a vyhodnoceny data z něj. Dále je zde uveden postup jak uvést daný modul do chodu a jak s ním dále pracovat.

Z výsledků je patrné, že testovaný inerciální modul má velké a značně nahodilé výchyly hodnot. Co do směru, ale i velikosti se nedá nijak předpovědět či odhadnout jejich vývoj. Jak bylo ale patrné především u druhého testovací metody, vývoj přírůstku chyby odpovídá danému zatížení modulu.

Kvůli výše uvedeným nedostatkům by nemělo být zařízení používáno pro dlouhodobou samostatnou navigaci bez dat z antény GPS. Tato navigace má smysl pouze pro prvních několik sekund, tedy je ji možno použít pouze u nahodilého krátkodobého výpadku signálu GPS. Naopak by bylo možné tento modul použít při zpřesňování GPS signálu a prostřednictvím programu Micro-View pro ovládání serv na zařízení, které je tímto modulem osazeno, či vizualizaci polohy tohoto zařízení.

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Obr. 1	Mechanický gyroskop.....	7
Obr. 2	Ukázka působení Coriolisovy síly	8
Obr. 3	Blokový diagram všech třech systémů INS/GPS	11
Obr. 4	Umělý horizont [22].....	13
Obr. 5	Ukázka strapdown systému [4].....	14
Obr. 6	Modul MNAV100CA [16]	18
Tab. 1	Specifikace modulu MNAV100CA.....	19
Obr. 7	Schéma datové komunikace modulu MNAV100CA [16].....	19
Obr. 8	Stargate modul [21]	20
Obr. 9	Procesorová deska modulu Stargate [20].....	21
Obr. 10	Karta obsahující konektory (tzv. Daughter Card) [20]	21
Obr. 11	Program MICRO-VIEW	22
Obr. 12	Náčrt konstantního pohybu modulu po kružnici.....	26
Obr. 13	Náčrt konstantního pohybu modulu po přímce.....	27
Obr. 14	Náčrt variabilního pohybu	28
Obr. 15	Schéma připojení napájení [16]	29
Obr. 16	Schéma připojení kabelu se sériovým portem [16]	30
Obr. 17	Nastavení programu PuTTY	31
Obr. 18	Ukázka upraveného souboru <code>ide.opts</code>	32
Obr. 19	Příprava na měření	33
Obr. 20	Ukázka běžícího měření.....	34
Obr. 21	Ukázka výstupního textového souboru <code>nav.txt</code>	35
Graf 1	Posun polohy v ose X (měření 1).....	36
Graf 2	Posun polohy v ose Y (měření 1).....	36
Graf 3	Posun polohy v ose Z (měření 1)	37
Graf 4	Odchylka polohy v ploše (měření 1).....	37
Graf 5	Vývoj odchylky v prostoru (měření 1)	38
Obr. 22	Vizualizace prvního měření v programu Google Earth	38
Graf 6	Posun polohy v ose X (měření 2).....	39
Graf 7	Posun polohy v ose Y (měření 2).....	39

Graf 8	Posun polohy v ose Z (měření 2)	40
Graf 9	Odchylka polohy v ploše (měření 2).....	40
Graf 10	Vývoj odchylky v prostoru (měření 2)	41
Obr. 23	Vizualizace druhého měření v programu Google Earth	41
Graf 11	Posun polohy v ose X (měření 3).....	42
Graf 12	Posun polohy v ose Y (měření 3).....	42
Graf 13	Posun polohy v ose Z (měření 3)	43
Graf 14	Odchylka polohy v ploše (měření 3).....	43
Graf 15	Vývoj odchylky v prostoru (měření 3)	44
Obr. 24	Vizualizace třetího měření v programu Google Earth	44
Obr. 25	Modul při měření	45
Obr. 26	Měření druhou metodou.....	46
Graf 16	Posun polohy v ose X (měření 1).....	46
Graf 17	Posun polohy v ose Y (měření 1).....	47
Graf 18	Posun polohy v ose Z (měření 1)	47
Graf 19	Odchylka polohy v ploše (měření 1).....	48
Graf 20	Vývoj odchylky v prostoru (měření 1)	48
Obr. 27	Vizualizace prvního měření v programu Google Earth	49
Graf 21	Posun polohy v ose X (měření 2).....	49
Graf 22	Posun polohy v ose Y (měření 2).....	50
Graf 23	Posun polohy v ose Z (měření 2)	50
Graf 24	Odchylka polohy v ploše (měření 2).....	51
Graf 25	Vývoj odchylky v prostoru (měření 2)	51
Graf 25	Posun polohy v ose X (měření 3).....	52
Graf 26	Posun polohy v ose Y (měření 3).....	52
Graf 27	Posun polohy v ose Z (měření 3)	53
Graf 28	Posun polohy v ploše (měření 3)	53
Graf 29	Vývoj odchylky v prostoru (měření 3)	54
Graf 30	Posun polohy v ose X (měření 1).....	55
Graf 31	Posun polohy v ose Y (měření 1).....	55
Graf 32	Posun polohy v ose Z (měření 1)	56
Graf 33	Posun polohy v ploše (měření 1)	56
Graf 34	Vývoj odchylky v prostoru (měření 1)	57
Obr. 28	Vizualizace prvního měření v programu Google Earth	57

Graf 35	Posun polohy v ose X (měření 2).....	58
Graf 36	Posun polohy v ose Y (měření 2).....	58
Graf 37	Posun polohy v ose Z (měření 2)	59
Graf 38	Posun polohy v ploše (měření 2)	59
Graf 39	Vývoj odchylky v prostoru (měření 2)	60
Graf 40	Posun polohy v ose X (měření 3).....	60
Graf 41	Posun polohy v ose Y (měření 3).....	61
Graf 42	Posun polohy v ose Z (měření 3).....	61
Graf 43	Posun polohy v ploše (měření 3)	62
Graf 44	Vývoj odchylky v prostoru (měření 3)	62
Obr. 29	Vizualizace robota	63
Obr. 30	Robot při testech	64

Použitá literatura

- [1]: **LEICK, Alfred:** GPS Satellite Surveying 3rd edition, vydáno John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004
- [2]: **RAPANT, Petr:** Družicové polohové systémy, vydáno Ostrava, 2002.
- [3]: **REICH, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin:** Encyklopedie Fyziky, 2006 – 2008
Dostupný na WWW: <http://fyzika.jreichl.com>
- [4]: **VERPLAETSE, Chris:** Strapdown systems, 26. 05. 1995
Dostupný na WWW:
<http://xenia.media.mit.edu/~verp/projects/smarten/node8.html>
- [5]: **VOJÁČEK, Antonín:** Akcelerometry – integrované snímače od AD, 06. 02. 2005
Dostupný na WWW:
<http://www.automatizace.hw.cz/view.php?cisloclanku=2005020601>
- [6]: **VOJÁČEK, Antonín:** MEMS - díl 1. - Co to je a jak to vypadá ?, 19. 11. 2006
Dostupný na WWW:
<http://www.automatizace.hw.cz/view.php?cisloclanku=2006111901>
- [7]: **VOJÁČEK, Antonín:** Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické, 14. 01. 2007
Dostupný na WWW:
<http://www.automatizace.hw.cz/view.php?cisloclanku=2007011401>
- [8]: **VOJÁČEK, Antonín:** Principy akcelerometrů - 2. díl - Piezorezistivní, 26. 01. 2007
Dostupný na WWW:
<http://www.automatizace.hw.cz/view.php?cisloclanku=2007012601>
- [9]: **VOJÁČEK, Antonín:** Gyroskopy v integrovaném provedení MEMS, 04. 01. 2006 Dostupný na WWW:
<http://www.automatizace.hw.cz/view.php?cisloclanku=2006010401>
- [10]: **VOJÁČEK, Antonín:** Co je to Kalmanova filtrace?, 29. 04. 2007.
Dostupný na WWW: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007042901>

- [11]: **WANG, Jianguo Jack:** Integration of GPS, INS and pseudolite to geo-reference surveying and mapping system, březen 2007
- [12]: **SYROVÁTKA, Viktor:** Úvod do systémů inerciální navigace, 25. 07. 2007
- [13]: **TAYLOR George & BLEWITT Geoff:** Intelligent Positioning: GIS-GPS unification, vydáno John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006
- [14]: **ZIEDAN, I. Nesreen:** GNSS Receivers for Weak Signals, vydáno Artech House, Inc., Norwood, 2006
- [15]: ---: Crossbow Technology Inc., 2007
Dostupný na WWW: <http://www.xbow.com/Products>
- [16]: ---: MNAV100CA User's Manual, Revision F, June 2007.
Dostupný na WWW:
http://www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/MNAV100CA_Users_Manual.pdf
- [17]: ---: MNAV Autopilot, 2007
Dostupný na WWW: <http://sourceforge.net/projects/micronav>
- [18]: ---: MNAV Datasheet, 2007.
Dostupný na WWW:
http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Inertial_pdf/uNAV_Datasheet.pdf
- [19]: ---: Portland State Aerospace Society, The Inertial Navigation Systems, 2008
Dostupný na WWW:
http://psas.pdx.edu/psas/Current_project/INS/INS_Home.html
- [20]: ---: Stargate Datasheet, 2007.
Dostupný na WWW:
http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/Stargate_Datasheet.pdf

[21]: ---: Stargate Developer's Guide, Revision B, January 2006

Dostupný na WWW:

http://www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/Stargate_Manual.pdf

[22]: ---: Wikipedia, Otevřená encyklopedie, 2008

Dostupný na WWW: <http://wikipedia.org>

Přílohy

1.1 Popis výstupních souborů modulu MNAV100CA

1.1.1 Struktura NAV.TXT

- (1) Zeměpisná šířka (stupně)
- (2) Zeměpisná délka (stupně)
- (3) Výška nad elipsoidem (metry)
- (4) Rychlost ve směru sever (cm/sec)
- (5) Rychlost ve směru východ
- (6) Rychlost ve směru kolmém na elipsoid
- (7) Error (1=OK)
- (8) Čas (sekundy od startu)

1.1.2 Struktura GPS.TXT

- (1) Zeměpisná šířka (stupně)
- (2) Zeměpisná délka (stupně)
- (3) Výška nad elipsoidem (metry)
- (4) Rychlost ve směru sever
- (5) Rychlost ve směru východ
- (6) Rychlost ve směru kolmém na elipsoid
- (7) ITOW (mili-sekundy)
- (8) Čas (sekundy od startu)

1.1.3 Struktura IMU.TXT

- (1) p – úhlová rychlost v ose X (stupně za sekundu)
- (2) q – úhlová rychlost v ose Y (stupně za sekundu)
- (3) r – úhlová rychlost v ose Z (stupně za sekundu)
- (4) ax – zrychlení v ose X (m/sec²)
- (5) ay – zrychlení v ose Y (m/sec²)

- (6) az – zrychlení v ose Z (m/sec^2)
- (7) Hx – magnetometr v ose X (Gauss)
- (8) Hy – magnetometr v ose Y (Gauss)
- (9) Hz – magnetometr v ose Z (Gauss)
- (10) Phi – pitch (rad)
- (11) Theta – roll (rad)
- (12) Psi – heading (rad)
- (13) Tx – teplota v ose X ($^{\circ}\text{C}$)
- (14) Ty – teplota v ose Y ($^{\circ}\text{C}$)
- (15) Tz – teplota v ose Z ($^{\circ}\text{C}$)
- (16) Statický tlak
- (17) Dynamický tlak
- (18) Error
- (19) Čas (sekundy od startu)